



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

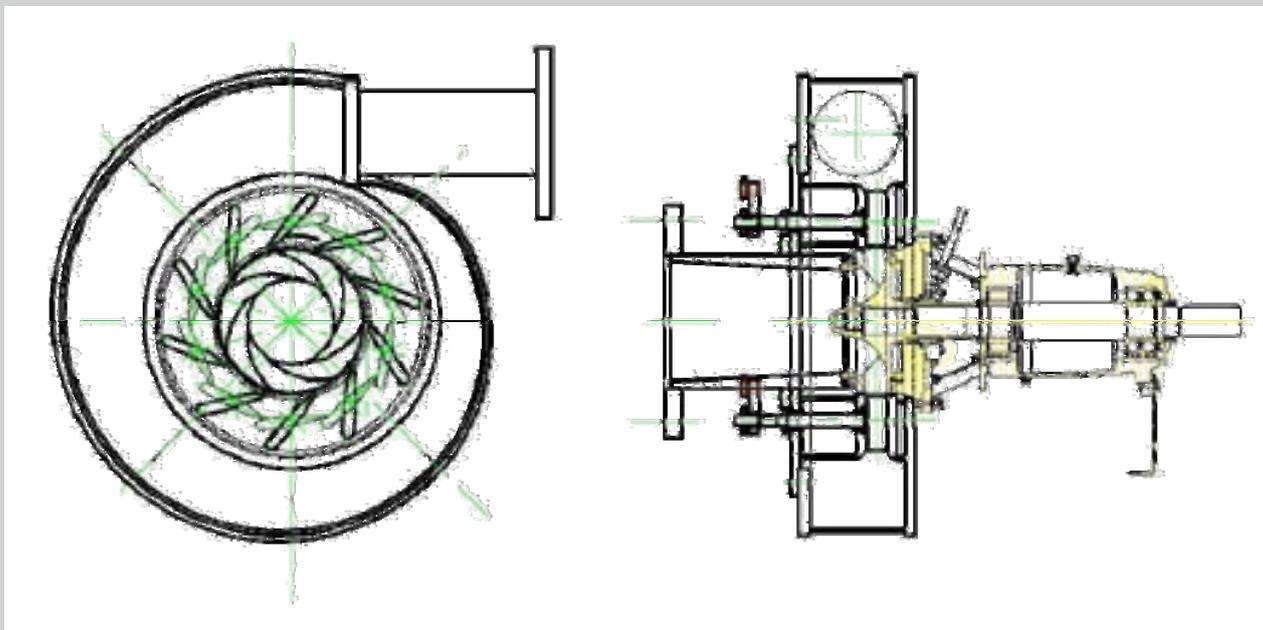
Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN

Energie-Forschung 2007

Recherche énergétique

Überblicksberichte der Programmleiter
Rapports de synthèse des chefs de programme



Kleinwasserkraft wieder gefragt!

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

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

Dr. Yasmine Calisesi, BFE, 3003 Bern / OFEN, 3003 Berne
Tel. 031 322 53 21 / Fax 031 323 25 00

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

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

www.energieforschung.ch / www.recherche-energetique.ch

30.04.2008

Vorwort / Avant-propos		3
Fortschritte der Energieforschung 2007 / <i>Survol de la recherche énergétique en 2007</i>		4
Überblicksberichte der Programmleiter / <i>Rapports de synthèse des chefs de programme</i>		
EFFIZIENTE	Energie in Gebäuden	9
ENERGIENUTZUNG	Verkehr und Akkumulatoren	21
UTILISATION EFFICACE DE L'ÉNERGIE	Elektrizitätstechnologien und -anwendungen	33
	Netze	47
	Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte	55
	Verbrennung	67
	Kraftwerk 2020	79
	Brennstoffzellen und Wasserstoff	91
	Verfahrenstechnische Prozesse	109
ERNEUERBARE ENERGIEN SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLES	Chaleur solaire	117
	Photovoltaik	129
	Utilisation industrielle de l'énergie solaire	147
	Biomasse und Holzenergie	155
	Wasserkraft inkl. Kleinwasserkraft	171
	Geothermie	179
KERNENERGIE ÉNERGIE NUCLÉAIRE	Windenergie	189
	Kerntechnik und nukleare Sicherheit	197
	Regulatorische Sicherheitsforschung	211
ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN FONDEMENTS DE L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE	Fusion thermonucléaire contrôlée	225
	Energiewirtschaftliche Grundlagen	231
Anhänge / Annexes		
Eidgenössische Energieforschungskommission CORE <i>Commission fédérale pour la recherche énergétique CORE</i>		243
Energieforschungsorganisation (F+E & P+D) <i>Organisation de la recherche énergétique (R+D & P+D)</i>		244
Wichtige Adressen <i>Adresses importantes</i>		245

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 (F+E)* sowie der *Pilot- und Demonstrationsprogramme (P+D)* obliegt BFE-internen und -externen Programmleitern. Für die Umsetzung der Ergebnisse in den Markt werden sie unterstützt durch die Bereichsleiter des Programms EnergieSchweiz. Eine Übersicht über die Organisation mit den Kontaktadressen findet sich im Anhang.

Die *Projektliste der Energieforschung des Bundes 2004/2005* gibt Auskunft über die Aufwendungen der mit öffentlichen Mitteln finanzierten Energieforschung sowie eine detaillierte Zusammenstellung der Geldflüsse. Die Gesamtzahlen für 2006 und 2007 liegen noch nicht vor; sie dürften jedoch – infolge verstärkter Anstrengungen im ETH-Bereich – etwas zugenommen haben. Schätzungen für 2007: 175 Mio. CHF, wovon 10 Mio. Franken für P+D-Projekte. Die entsprechenden Aufwendungen des BFE betragen 20,31 bzw. 1,03 Mio. CHF.

Der vorliegende Band enthält die Jahres-Überblicksberichte der BFE-Programmlinien. Darin sind die Fortschritte in denjenigen Projekten beschrieben, welche durch das BFE mitfinanziert worden sind. Enthalten sind aber auch Hinweise auf andere mit öffentlichen und privaten Mitteln durchgeführte Forschungsarbeiten. Dieser Bericht kann – zusammen mit weiteren Publikationen – auch auf der Internetseite beim BFE: www.energieforschung.ch (Themen: Überblicksberichte) eingesehen und heruntergeladen werden.

Der detaillierte Fortschritt einzelner Projekte kann in den Projekt-Jahresberichten (JB) verfolgt werden, die von den entsprechenden Programmleitern via Internet abgegeben werden. Die Projekt-Schlussberichte (SB) können beim BFE bezogen werden (Datenbank Energieforschung): www.energieforschung.ch. Das Reproduzieren von einzelnen Beiträgen ist – unter Angabe der Quelle – gestattet.

April 2008
BUNDESAMT FÜR ENERGIE

Titelbild: Einbau eines Leitapparats in eine Standardpumpe zur Kleinwasserkraftnutzung (Bild: JMC Engineering – J.-M. Chappallaz Ing. EPFL; siehe Forschungsprogramm «Wasserkraft»).

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. La gestion des divers programmes de *recherche et développement (R+D)* et des *installations pilotes et de démonstration (P+D)* relève de la responsabilité de chefs de programme internes ou externes à l'OFEN. Pour l'introduction sur le marché, ceux-ci sont appuyés par les responsables de domaines du programme SuisseEnergie. On trouvera, en annexe, un aperçu de cette organisation ainsi que les adresses de contact.

La *Liste des projets de la recherche énergétique de la Confédération 2004/2005* renseigne sur les dépenses des pouvoirs publics pour la recherche énergétique, et donne une revue détaillée des montants provenant des diverses sources de financement. Les chiffres pour 2006 et 2007 ne sont pas encore connus ; du fait d'une intensification des efforts consentis par le Domaine des EPF, ils devraient cependant être quelque peu supérieurs à ceux de l'année précédente. Estimations pour 2007 : 175 MCHF, dont 10 MCHF pour les projets P+D. Quant aux dépenses de l'OFEN, celles-ci se montent à 20,31 MCHF, dont 1,03 MCHF pour les projets P+D.

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. Ce rapport – tout comme d'autres publications – peut être consulté et téléchargé sur le site Internet de l'OFEN : www.recherche-energetique.ch (Thème : Rapports de synthèse).

La plupart des rapports annuels (RA) relatifs aux projets cités dans les rapports de synthèse sont eux aussi téléchargeables. Les rapports finaux (RF) se trouvent sur le site Internet de l'OFEN (base de données Recherche énergétique) : www.recherche-energetique.ch. La reproduction d'extraits du présent document est autorisée, à condition d'en indiquer la source.

Avril 2008
OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉNERGIE

Page de titre : montage d'un distributeur sur une pompe standard pour l'exploitation de la petite force hydraulique (Source : JMC Engineering – J.-M. Chappallaz Ing. EPFL ; voir programme de recherche «Force hydraulique»).

FORTSCHRITTE DER ENERGIEFORSCHUNG 2007

SURVOL DE LA RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE EN 2007

GERHARD SCHRIBER / YASMINE CALISESI

FORSCHUNGSKOORDINATION BFE / COORDINATION DE LA RECHERCHE OFEN

«Die Internationale Energie-Agentur schätzt die Anstrengungen der Schweiz, ihre führende Rolle in der Energieforschung weiter zu verstärken.» So heisst es in der Beurteilung einer international zusammengesetzten Expertengruppe der IEA, welche 2007 unsere Energiepolitik einer Prüfung unterzogen hat. Diese Anerkennung gebührt insbesondere den engagierten Forschern: sie tragen mit qualitativ hoch stehenden Arbeiten und innovativen Lösungen wesentlich bei zu einer nachhaltigen Energieversorgung.

Im Energiesektor ist der Weg der Forschungsergebnisse hin zur Anwendung jedoch relativ lang, deshalb bleibt der Austausch mit den Markt-Arbeiten von *EnergieSchweiz* wichtig. Beschleunigend wirkt auch die internationale Zusammenarbeit. Über 50% der öffentlich finanzierten Energieforschung ist direkt mit internationalen Projekten verknüpft.

2007 sind die Weichen für die nächsten vier Jahre gestellt worden: Die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE hat das *Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011* vorgelegt. Über 150 namhafte Persönlichkeiten aus Industrie, Wirtschaft, Politik und Verwaltung haben dieses an der *8. Schweizerischen Energieforschungs-Konferenz* bereinigt und bestätigt. Dasselbst wurde auch die zentrale Rolle des Bundesamts für Energie BFE betont. Das Amt hat sich auf den Jahresbeginn 2008 neu organisiert, dabei erfahren die Forschungsaktivitäten eine Verstärkung. Ausgebaut wird besonders der Technologietransfer (u.a. die Wiederaufnahme von Pilot- und Demonstrationsprojekten) sowie die Aus- und Weiterbildung im Energiesektor.

Auch 2007 sind in der Energieforschung bemerkenswerte Fortschritte zu verzeichnen. Nachfolgend ist eine Auswahl davon zusammengestellt. Diese stellt keine Gewichtung dar; vielmehr soll sie die Neugier des Lesers auf weitere Forschungsergebnisse wecken, sei es in den vorliegenden Überblicken oder in den Berichten der verschiedenen Forschungsstätten.

« L'Agence internationale de l'énergie salue les efforts développés par la Suisse afin de renforcer son rôle de leader dans le domaine de la recherche énergétique ». Ainsi est formulé le jugement émis par un groupe d'experts internationaux, chargés en 2007 par l'AIE d'examiner notre politique énergétique. Cette reconnaissance revient tout particulièrement à nos chercheurs et à leur engagement : grâce à leurs travaux de qualité et à leurs solutions innovantes, ils contribuent d'une façon fondamentale au développement d'un approvisionnement énergétique durable. Dans le secteur de l'énergie, le chemin menant de l'obtention de résultats de la recherche à leur mise en application reste cependant relativement long. De ce fait, les échanges avec le programme *SuisseEnergie* pour la diffusion des nouvelles technologies sur le marché demeurent d'une importance primordiale. La collaboration internationale apporte également un effet d'accélération. Plus de 50% de la recherche énergétique financée par les collectivités publiques est directement liée à des projets internationaux.

Avec son *Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération pour les années 2008 à 2011*, la Commission fédérale pour la recherche énergétique CORE a en 2007 tracé la voie des quatre années à venir. Plus de 150 personnalités issues des milieux de l'industrie, de l'économie, de la politique et de l'administration ont, à l'occasion de la *8^e Conférence suisse sur la recherche énergétique*, épuré et approuvé ce document. Ici encore, on a souligné le rôle central joué par l'Office fédéral de l'énergie OFEN. Au 1^{er} janvier 2008, l'Office s'est doté d'une nouvelle organisation visant à un renforcement des activités de recherche. Le transfert technologique (avec entre autres la reprise du soutien aux projets pilotes et de démonstration), ainsi que la formation et la formation continue, seront ainsi particulièrement développés.

En 2007 aussi, de remarquables progrès ont été accomplis par la recherche énergétique. Une sélection en est présentée ci-après. Ce choix ne reflète cependant aucun jugement de valeur ; au contraire, il a pour but d'éveiller la curiosité du lecteur pour les autres résultats, que ceux-ci soient publiés dans les présents rapports de synthèse, ou dans les rapports propres des différentes institutions de recherche.

EFFIZIENTE ENERGIENUTZUNG

Ergebnisse der Forschung im Gebäudebereich sind weitere Planungswerkzeuge für **energetisch optimierte Neubauten und Renovationen**. Wesentliche Beiträge liegen nun auch vor zur Entwicklung **nachhaltiger Quartiere**.

Abgeschlossen wurde 2007 zudem das Projekt **Wattwerk** (www.wattwerk.ch), das erste Minergie-P-Gewerbegebäude, das sogar Stromlieferant ist. Es wurde bereits in den Vorjahren durch den schweizerischen und europäischen Solarpreis ausgezeichnet.

Im Verkehrsbereich zeigen Abklärungen, dass die Einführung eines **Bonus-Malus-Systems beim Autokauf** positive Effekte auf den Energieverbrauch der Fahrzeugflotte haben kann. Eine Simulation der Fahrweise **Eco-Drive** bei schweren Nutzfahrzeugen ergibt zudem beispielsweise für die Strecke Zürich-Bellinzona das markante Einsparpotential von 4–6%.

Forschungsfortschritte unterstützen den Vormarsch der **Hybrid-Fahrzeuge** (fossil, elektrisch): Mit einer neuen Regelstrategie kann eine Verbrauchssenkung von 4% erreicht werden. Und beim einzigen Hybrid-Fahrzeug (TOHYCO-Bus des Verkehrshauses Luzern), welches allein über **Ultrakondensatoren** als Energiespeicher verfügt, wurde gezeigt, dass durch **Rekuperation der Bremsenergie** im Mittel 25% Treibstoff eingespart werden kann.

Die über Jahre – und auch 2007 – verfeinerte Pinch-Methode erlaubt **Prozessoptimierungen in technologischen Verfahren**. Durch ihre Anwendung kann der CO₂-Ausstoss unserer Industrien um einige Millionen Tonnen pro Jahr gesenkt werden.

Der magnetokatorische Effekt könnte – wie grundlegende Analysen ergeben – in Haushalt-**Kühlgeräten** zur Anwendung gelangen, womit auf **Kältemittel verzichtet werden könnte**. Umgekehrt zeichnen sich Anwendungen ab zur **«magnetischen Stromerzeugung»** aus Abwärme.

Zur Umwandlung von Wärme in Strom werden auch thermoelektrische Materialien (Seebeckeffekt) untersucht, wobei die **direkte Elektrizitätserzeugung aus Sonnenwärme** interessante Perspektiven eröffnet.

Bedeutende Studien auf nationaler und internationaler Ebene befassen sich mit **«intelligenten Stromnetzen»**.

Für praktische Abklärungen zur **dezentralen Elektrizitätseinspeisung** im Niederspannungsbereich läuft im Sommer 2008 in Rheinfelden ein erster Feldversuch an.

Mit einer für **Verbrennungsvorgänge** neu entwickelten Simulationsmethode (Lattice Boltzmann) können Strömungen in Mikrokanälen und porösen Medien **effizient errechnet werden**. Anwendungen

UTILISATION EFFICACE DE L'ÉNERGIE

Outre le développement d'outils de planification de **bâtiments neufs optimisés énergétiquement et de rénovations**, plusieurs contributions essentielles à la recherche dans le domaine du bâtiment visent à l'aménagement de **quartiers urbains durables**.

Relevons en 2007 la conclusion du projet **Wattwerk** (www.wattwerk.ch), premier bâtiment industriel à satisfaire aux normes Minergie-P, qui reçut successivement en 2004 et 2005 les prix solaires européen et suisse.

Une étude dans le domaine des transports a montré que l'introduction d'un **système de bonus/malus à l'achat** pouvait apporter une réduction de la consommation de la flotte des véhicules en circulation. Une simulation de la méthode **Eco-Drive** appliquée à la conduite de véhicules utilitaires lourds indique en outre un potentiel d'économie de carburant de 4–6% sur le trajet Zürich – Bellinzona.

La recherche a soutenu la progression des **véhicules hybrides** (énergie fossile, électrique) : une nouvelle stratégie de réglage permet une économie de consommation de 4%. Et le bus TOHYCO-Rider, seul véhicule hybride à posséder des **supercondensateurs** comme unique support d'énergie, a démontré qu'une économie de l'ordre de 25% en moyenne était possible grâce à la récupération de **l'énergie de freinage**.

Affinée au fil des ans et encore en 2007, la méthode *Pinch* permet l'**optimisation des processus et procédés industriels**. Son application permettrait de réduire les émissions de CO₂ de notre industrie de quelques millions de tonnes par année.

Selon une analyse, l'effet magnéto-calorique pourrait être appliqué au développement de **réfrigérateurs domestiques sans agent frigorigène**. À l'inverse se dessine l'utilisation des rejets de chaleur pour la **production « magnétique » de courant**.

Les matériaux thermoélectriques, offrant la possibilité d'une conversion directe de chaleur en électricité (effet Seebeck), sont également étudiés et ouvrent en particulier la perspective d'une **production directe d'électricité à partir de chaleur solaire**.

Des travaux d'importance nationale et internationale s'attachent aux **« réseaux électriques intelligents »**.

Les aspects pratiques liés à l'**injection décentralisée d'électricité** dans les réseaux à basse tension seront clarifiés sur le terrain de Rheinfelden dès l'été 2008.

Une nouvelle méthode (Lattice Boltzmann) permet de **simuler de façon efficiente** les écoulements dans les microcanaux et les milieux poreux lors de la **combustion**. Des applications se dessinent par ailleurs pour les reformeurs, les catalyseurs, les microbrûleurs et les piles à combustible.

gen ergeben sich auch für Reformer, Katalysatoren, Mikrobrenner und Brennstoffzellen.

Die Schweizer Entwicklung einer Referenzanlage zur **Optimierung grosser Dieselmotoren** hat vom internationalen Rat für Verbrennungsmaschinen den **BP Award on Health, Security and Environment** zugesprochen erhalten.

Es darf als Erfolg gewertet werden, dass das vor 2,5 Jahren gestartete Programm **Gas- und Dampf-Kraftwerk 2020** nun in allen Schlüsselthemen Forschungsprojekte laufen hat. Dies betrifft insbesondere die Bestrebungen für eine **Reduktion der CO₂-Emissionen**, u.a. durch **Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads und Einbezug CO₂-neutraler Brennstoffe** (z.B. Biogas).

Schweizer Forscher haben einen Aufbau für **SOFC-Brennstoffzellen** entwickelt, welcher Dank Abgasrückführung eine **Lebensdauer von über 3000 Stunden** ermöglicht hat. Dieser Aufbau ist von der EU zur neuen Referenz ernannt worden. Angestrebt wird eine Lebensdauer von mindestens 10'000 Stunden.

ERNEUERBARE ENERGIEN

2007 wurden Versuche einer neuartigen **Produktion des Energieträgers Wasserstoff durch Solarstrahlung** durchgeführt: Lichtempfindliche Eisen-Schwefel-Verbindungen erzeugen Protonen, welche via Chromophore zu Wasserstoffmolekülen reduziert werden.

Die **Speicherung von Wasserstoff in Metallhydriden** wird jährlich verbessert. Betrug 2000 die gravimetrische Speicherdichte etwa 3%, erreichte sie 2007 18% (Lithium-Borohydrid). Zudem konnte bei diesem Hybrid erstmals die Raumtemperaturstruktur bestimmt werden.

Durch die Verbindung von **kristallinen und amorphen Silizium-Solarzellen** kann eine geringe Dicke und doch hohe Effizienz erreicht werden. 2007 ergaben erste Versuche bereits 19% Wirkungsgrad. Angestrebt werden 22%.

Die Untersuchungen zur **Kombination eines Wechselrichters mit einer unterbrochslosen Stromversorgung** zeigen die Machbarkeit des Konzepts mit vertretbarem Aufwand. Eine Pilotanlage soll nun die Funktionstüchtigkeit aufzeigen.

Mit einem Prototyp wurde die technische Machbarkeit eines **neuartigen Kollektors für solarthermische Kraftwerke** demonstriert. Statt teure Parabolspiegel wird eine reflektierende Membran verwendet, was die Kosten für solche Kollektoren mehr als halbieren könnte. Es sind jedoch weitere Tests erforderlich.

20 Jahre lang waren **transparente Abdeckungen von thermischen Sonnenkollektoren** der Sonne ausgesetzt (in Davos und Rapperswil). Dies erlaubt nun belastbare Aussagen über die Beständigkeit der Materialien: Glas zeigt das beste Lang-

Le développement suisse d'une installation de référence pour l'**optimisation de moteurs diesel de grandes dimensions** a été récompensé par le Conseil international des machines à combustion, avec le « **BP Award on Health, Security, and Environment** ».

Le programme **Centrales à gaz et vapeur 2020** peut se targuer d'avoir réussi à initier en seulement 2,5 ans des projets de recherche sur tous les aspects-clé de ce domaine. Ceci concerne en particulier les efforts de **réduction des émissions de CO₂**, par **l'augmentation du rendement et la prise en compte de combustibles neutres** (p. ex. biogaz).

Les chercheurs suisses ont développé une configuration de **pile à combustible SOFC** faisant preuve d'une **durée de vie de plus de 3000 heures**, grâce à la récupération des gaz résiduels. Cette configuration a été citée comme nouvelle référence par l'UE. À terme, une durée de vie de 10'000 heures au minimum est visée.

SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLES

En 2007 se sont déroulés les essais d'un procédé novateur de **production d'hydrogène à partir de rayonnement solaire** : un composé photosensible de fer et de soufre émet des protons, qui sont réduits à l'état de molécules d'hydrogène via des chromophores.

Le **stockage d'hydrogène dans les hydrures métalliques** s'améliore chaque année. Encore de 3% en 2000, la densité gravimétrique de stockage a atteint 18% en 2007 (borohydride de lithium, dont on a pu pour la première fois déterminer la structure à température ambiante).

L'association de **cellules solaires de silicium cristallin et amorphe** permet d'atteindre un rendement élevé pour une épaisseur réduite. En 2007, les premiers essais ont déjà atteint une efficacité de 19%. Le but visé est de 22%.

Les essais relatifs à la **combinaison d'un onduleur avec un système d'alimentation sans interruption** démontrent la faisabilité du concept pour un investissement raisonnable. Une installation pilote doit maintenant confirmer l'efficacité de fonction du système.

La faisabilité technique d'un nouveau concept de **collecteurs pour centrales thermiques** a été démontrée grâce à un prototype. Une membrane réfléchissante est utilisée au lieu des onéreux miroirs paraboliques, permettant de réduire de plus de la moitié le coût des collecteurs. Des tests supplémentaires sont cependant nécessaires.

Durant 20 ans, les **revêtements transparents de collecteurs solaires thermiques** ont été exposés au soleil de Davos et de Rapperswil. On peut tirer de cette exposition un bilan à long terme de la résistance des matériaux : le verre montre le meilleur comportement, les seuls matériaux inadéquats étant les matières plastiques chlorées.

zeitverhalten, nicht geeignet sind einzig chlorierte Plastikmaterialien.

Mehrjahresmessungen einer Anlage zur **Enteisung von Brücken mittels einer saisonalen Wärmespeicherung** ermöglichten die Entwicklung eines Simulationswerkzeugs (BRIDGESIM). Mehrere Länder, darunter USA und Japan, haben bereits Interesse an dieser Planungshilfe angemeldet.

Umfassende Untersuchungen zeigen auf, wie die **Emissionen von Feinstaub und Schadstoffen bei Holzfeuerungen** durch richtiges Anfeuern und adäquate Betriebsweise drastisch gesenkt werden können. Selbst bei modernen Brennkammern für Holzfeuerstätten liegen die Staubabgabefaktoren 60–180% über dem Zielwert.

Die systematische **Bilanzierung von Biotreibstoffen**, unter Berücksichtigung der gesamten Prozessketten, ergibt, dass Biotreibstoffe nicht zwingend umweltfreundlicher sind als fossile Treibstoffe. Es besteht oft ein Zielkonflikt zwischen der Minimierung der Treibhausgasemissionen und einer positiven ökologischen Gesamtbilanz (**ecoinvent-Datenbank v2.0**).

Wärmepumpen ohne Zusatzheizung für Brauchwarmwasser sind in Reichweite gerückt. Mit einem aussen liegenden Wärmetauscher konnten Wassertemperaturen von 57 °C bei einer Leistungszahl von 3,15 erreicht werden. Untersucht wird nun der Einsatz einer sekundärseitigen Laderegulierung, welche Temperaturen über 60 °C ermöglichen dürfte.

Die Forschung an **magnetischen Wärmepumpen** ist nun soweit, dass ein Prototyp gebaut und ausgemessen werden kann. Er soll geeignet sein für Fussbodenheizungen mit Erdsonden als Wärmequelle.

Es ist eine Lösung gefunden worden, **Wasserpumpen auch für variable Durchflüsse als Turbinen** einzusetzen. Durch den Einbau eines verstellbaren Leitapparats in Standardpumpen für Kleinwasserkraftwerke können diese wie Francis-Turbinen genutzt werden, sind aber bedeutend billiger.

Tiefe Aquifere könnten bereits mittelfristig zur **geothermischen Elektrizitätserzeugung** genutzt werden. Abklärungen in Lavey (VD) beispielsweise haben ergeben, dass in ca. 3 km Tiefe ein Reservoir von 110 °C heissem Wasser mit einer Förderate von über 50 L/s liegt. Damit wäre eine Nettoleistung von 1,1 MW_e möglich, für Gestehungskosten bereits ab 8 Rp/kWh. Die beträchtliche zur Verfügung stehende Wärme läge zwischen 4–15 MW_{th}.

Die Evaluation einer in der Schweiz entwickelten **Leichtwind-Kraftanlage** zeigt die Überlegenheit des Konzepts gegenüber der Konkurrenz: Der überdimensionierte Rotordurchmesser von 12 m ermöglicht Leistungen von 7 kW und hohe Wirkungsgrade auch bei Windgeschwindigkeiten unter 4 m/s.

Les mesures pluriannuelles auprès d'une installation de **dégivrage d'un pont au moyen d'un réservoir thermique saisonnier** ont mené au développement d'un outil de simulation (BRIDGESIM). Plusieurs pays, dont les USA et le Japon, ont déjà fait part de leur intérêt.

Des investigations détaillées ont démontré que les **émissions de particules fines et de substances nocives lors de feux de bois** peuvent être réduites de façon significative par un allumage et un entretien adéquat du foyer. Même les chambres à combustion de cheminées modernes affichent des facteurs d'émission dépassant de 60 à 180% la valeur-cible.

Le **bilan écologique des produits énergétiques** a révélé le caractère mitigé de ce bilan pour les biocarburants, ceux-ci n'étant pas toujours plus respectueux de l'environnement que les combustibles fossiles lorsque l'ensemble de la chaîne de production est prise en compte (**base de données ecoinvent v2.0**).

Les **pompes à chaleur pour la préparation d'eau chaude sanitaire sans chauffage additionnel** sont à portée de main. De l'eau à 57 °C pour un coefficient de performance de 3.15 a été obtenue grâce à des échangeurs de chaleur externes. On vise maintenant à atteindre une température de plus de 60 °C, moyennant une régulation secondaire de la charge.

La recherche autour des **pompes à chaleur magnétiques** a débouché sur le développement d'un prototype dédié au chauffage par le sol, et utilisant une sonde géothermique comme source chaude.

Une solution a été trouvée pour l'utilisation de **pompes hydrauliques en tant que turbines** dans les petites centrales hydrauliques à débit variable. Le montage d'un distributeur ajustable sur une pompe standard permet d'obtenir l'équivalent d'une turbine Francis, à un coût cependant considérablement moindre.

Les gisements aquifères profonds pourraient être exploités à moyen terme déjà pour la **production d'électricité géothermique**. Dans le sous-sol de Lavey (VD), un réservoir à une température de 110 °C et un débit minimal de 50 L/s a été identifié à une profondeur de 3 km environ. Son exploitation permettrait de dégager une puissance électrique nette de 1.1 MW_e, à un coût descendant jusqu'à 8 cts/kWh. Le potentiel de chaleur exploitable se situerait entre 4 et 15 MW_{th}.

L'évaluation d'une **installation éolienne** conçue en Suisse pour répondre à de **faibles conditions de vent** a dévoilé la supériorité de ce concept par rapport à la concurrence : le rotor surdimensionné de 12 m dégage une puissance de 7 kW et un rendement élevé également pour une vitesse de vent inférieure à 4 m/s.

KERNENERGIE

Für den Vergleich von **Reaktorkonzepten der Generation IV** ist eine numerische Prozedur entwickelt worden. Sie ermöglicht Langzeitsimulationen von Reaktorbetrieben, bei welchen **abgebrannter Brennstoff für die Fabrikation neuer Brennelemente** verwendet werden könnte. Dies würde allerdings eine Weiterentwicklung der Aufbereitungsverfahren bedingen. Die energetische Ausbeute könnte jedoch gegenüber heutigen Reaktoren bis zu **20 Mal erhöht** werden. Anstatt radioaktiven Abfall erhielte man neuen Brennstoff.

Zusammen mit 17 anderen Ländern beteiligt sich die Schweizer KKW-Sicherheitsbehörde an den Arbeiten beim **Forschungs-Reaktor Halden** (Norwegen). Brennelemente und Materialien sowie menschliche Zuverlässigkeit können dort unter realistischen Bedingungen untersucht werden. Ergebnisse 2007 sind u.a. zuverlässige Angaben über die **Spaltgasfreisetzung** von Uranoxidbrennstoff mit Additiven, über den Einfluss der Wasserchemie auf das **Risswachstum** in Stählen aus Reaktorstrukturen, oder auch über das **Verhalten von Personal** bei der Bedienung komplexer Systeme.

Das Studium **sozio-ökonomischer Effekte der Kernfusion** zeigt, dass deren Einführung die **CO₂-Emissionen gegenüber Referenzfällen beträchtlich verringert**. Gemäss heutigen Erkenntnissen wird die Fusionstechnologie verglichen mit Erdgas in der 2. Hälfte des Jahrhunderts konkurrenzfähig sein.

Bedeutende schweizerische Ergebnisse 2007 im technischen Bereich der Kernfusion beinhalten: Phänomene der **Plasma-Rotation**, die **rechnerische Simulation** des Plasmas in Reaktoren, Physik und Mechanik von **Materialien für Reaktor-Komponenten** (u.a. Oberflächen von hoch-reflektierenden Spiegeln).

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Detaillierte Abklärungen zu den Möglichkeiten der **Abwärmenutzung** ergeben ein theoretisches Potential von 15.8 TWh/a (Abkühlung des gesamten ARA-Abflusses auf 5 °C). Wirtschaftlich rentabel sind jedoch nur 3,7 TWh/a, was rund einem Zehntel des schweizerischen Energiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser der Haushalte entspricht.

Eine Studie über **Innovationsprozesse** im Energiebereich bestätigt, dass **Marktentwicklungen** in den betreffenden Technologiefeldern entscheidend sind für den Innovationserfolg. Sie zeigt aber auch auf, dass staatliche Förderung auch in späteren Innovationsphasen (inkl. Pilot und Demonstrationsvorhaben) bedeutend sein kann.

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Une procédure numérique pour la comparaison de concepts de **réacteurs de Génération IV** a été développée. Celle-ci permet une simulation sur le long terme d'un régime de fonctionnement dans lequel le combustible nucléaire usé serait utilisé pour la fabrication de nouveaux éléments de combustible. Ceci permettrait une **multiplication allant jusqu'à 20 du rendement énergétique** des combustibles actuels. Le combustible usé pourrait de ce fait passer du statut de déchet à celui de matière première pour alimenter d'éventuels futurs réacteurs.

L'autorité suisse de surveillance des installations nucléaires participe avec 17 autres pays aux travaux auprès du **réacteur expérimental de Halden** (Norvège). On y étudie le comportement d'éléments de combustible et de matériaux, ainsi que le comportement humain dans des conditions réalistes. En 2007, les recherches ont porté sur la **libération de produits de fission gazeux** par du combustible d'oxyde d'uranium avec additifs, sur l'influence de la chimie de l'eau sur la **croissance de fissures** dans l'acier du réacteur, ou encore sur le **comportement du personnel** lors du manie-ment de systèmes complexes.

L'étude des **effets socio-économiques de la fusion** montre que son déploiement permettra une **réduction considérable des émissions de CO₂**. Du point de vue économique, on prévoit que la fusion thermonucléaire sera concurrentielle face au gaz naturel dès la deuxième moitié du siècle.

Pour les aspects technologiques de la fusion, des résultats suisses importants ont été obtenus quant aux phénomènes de **plasma-rotation**, à la **simulation numérique** des plasmas, et à la physique et à la mécanique de **matériaux pour composants de réacteurs** (en particulier, les surfaces de miroirs hautement réfléchissants).

FONDEMENTS DE L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE

L'analyse des possibilités d'**exploitation de la chaleur résiduelle des effluents de centrales d'épuration** révèle un potentiel théorique de 15.8 TWh par an (refroidissement de l'ensemble des effluents à 5 °C). La part économiquement rentable est de 3.7 TWh par an, soit environ 10% des besoins énergétiques suisses pour le chauffage et la préparation d'eau chaude sanitaire.

Une étude sur les **processus d'innovation** dans le domaine de l'énergie confirme l'impact décisif du **développement du marché** dans les branches technologiques concernées. L'étude démontre également l'importance d'un soutien par les collectivités publiques, également dans les phases tardives de l'innovation (y inclus les projets pilotes et de démonstration).

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

ENERGIE IN GEBÄUDEN

Charles Filleux

filleux.ren@bhz.ch



BaBel Street Channel in Betrieb

Vier Monitore entlang der Baselstrasse in Luzern bieten rund um die Uhr Informationen aus dem Quartier für das Quartier. Ziel ist eine nachhaltige Quartierentwicklung (www.babelquartier.ch).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Forschungsaktivitäten sind so ausgerichtet, dass deren Ergebnisse massgeblich zur Erreichung der angestrebten 2000-Watt-Gesellschaft beitragen. Durch weiterführende Forschung kann der Energiebedarf – unter Beibehaltung eines hohen Nutzerkomforts und optimierter Technikausstattung – weiter verringert werden. Wichtig dazu sind insbesondere verbesserte Wärmedämm-, Fenster- und Lüftungstechniken sowie die Steigerung der Energieeffizienz elektrischer Anwendungen. Beim Raumklima liegt – vor allem bei der Kühlung von Gebäuden – noch Forschungsbedarf vor. Ein weiteres Thema ist der Einbezug von neuen Baumaterialien zur Senkung der grauen Energie.

Das Hauptgewicht der Aktivitäten des Forschungsprogramms für die aktuelle Berichtsperiode basiert auf den Schwerpunkten des Programms 2004 - 2007:

- **Gebäudekonzepte und Planungswerkzeuge:** Bei der Sanierung bestehender Gebäude wird heute noch allzu oft komponentenweise vorgegangen. Dies führt zu ineffizienten und teuren Lösungen. Es ist deshalb das Ziel zusammen mit der Industrie wirtschaftlich und technisch attraktive Gesamtlösungen zu entwickeln.
- **Nachhaltigkeit in Gebäude und Quartier:** Zusammen mit dem Bundesamt für Wohnungswesen und dem Bundesamt für Raumentwicklung

sollen die Erfordernisse und Möglichkeiten einer nachhaltigen Quartierentwicklung anhand von vier typischen Quartieren exemplarisch untersucht werden. Es werden nicht nur die ökologischen sondern auch die wirtschaftlichen und sozialen Aspekte der Quartierentwicklung angegangen.

- **Hochdämmende Baustoffe:** Nach der Erarbeitung von Grundlagen zu Materialeigenschaften, Alterungsverhalten und Anwendungstechnik von vakuumisolierten Dämmsystemen soll die Konstruktion und industrielle Fertigung von vorgefertigten Bauelementen untersucht und vorangetrieben werden.
- **Komfortkühlung:** In Ergänzung zu den bestehenden Konzepten zur Vermeidung von Kühllast und zum Einsatz von passiven Kühlstrategien sollen intelligente Kombinationen mit aktiven Kälte-techniken evaluiert und entwickelt werden, welche in der Lage sind, kostenoptimiert und energieeffizient den gewünschten Komfort zu garantieren.
- **Minimierung des Elektrizitätsverbrauchs haustechnischer Anlagen:** Es sind Technologien zu entwickeln, welche zu einer wesentlichen Verbesserung der elektrischen Effizienz haustechnischer Anlagen inkl. Beleuchtung führen. Die Projekte werden, insbesondere wenn sie die Gerätetechnik betreffen, in Zusammenarbeit mit dem Forschungsprogramm «Elektrizitätstechnologien und -anwendungen» durchgeführt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

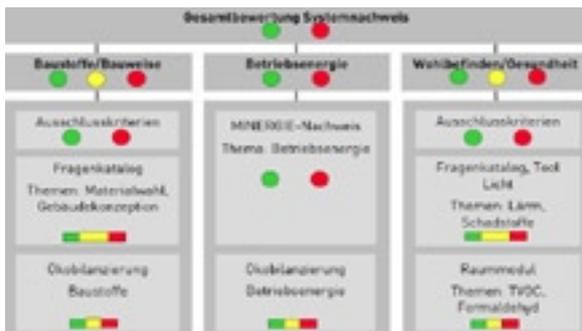
Ende 2007 waren im Forschungsprogramm 43 Projekte direkt angesiedelt, wovon knapp die Hälfte vor dem Abschluss standen. In dieser Berichtsperiode ist die Anzahl der eingereichten Schlussberichte entsprechend gross. Ihren Abschluss nahmen insbesondere die Projekte zum Schwerpunkt Nachhaltige Quartierentwicklung, sowie jene zu vakuumisolierten Dämmsystemen.

GEBÄUDEKONZEPTE / PLANUNGSWERKZEUGE

Weiterentwicklung der Klimafächen und -software zu erhöhter Praxistauglichkeit [1]. Das Programm *Energy Design Guide II* (bisher als Klimafächenmethode bekannt) ist für Architekten und Planende entwickelt, um in der Entwurfsphase einen Raum, respektive ein Gebäude, energetisch zu optimieren. Das ausserordentlich gute Verhältnis zwischen dem dabei zu erbringendem Aufwand und des hohen energetischen Optimierungsgrades ist ein enormer Vorteil gegenüber herkömmlichen Simulationsprogrammen. Die Software steht kostenlos unter www.energy-design-guide.ch zur Verfügung.

Mit dem Projekt **Systemnachweis MINERGIE-ECO (Systemnachweis für nachhaltige Hochbauten)** [2] wurde eine Weiterentwicklung des bestehenden Gebäudelabels MINERGIE-ECO erstellt. Dieser dient als Instrument zur Beurteilung und Auszeichnung gesundheitlich und bauökologisch vorbildlicher Bauten. Die Arbeit im Jahr 2007 diente weitgehend zur Umsetzung der in der Planungsphase erarbeiteten Konzepte, so dass das Projekt im ersten Viertel 2008 abgeschlossen werden soll. Im Bereich Betriebsenergie wurden die *Dynamic Link Library (DLL)*-Softwarebausteine zur Energiebilanzierung grossteils fertiggestellt, indem die Vorgaben der neusten SIA-Normen 380/1 und 380/4 sowie des SIA-Merkblattes 2031 umgesetzt wurden. Für die Ökobilanz im Bereich Baustoffe/Bauweise wurde die Berechnung komplett programmiert und die wichtigsten Voraussetzungen der Datenbasis auf Grundlage des SIA-Merkblattes 2032 definiert. Im Bereich Wohlbefinden/Gesundheit wurde der Algorithmus des Raummodells zur Bewertung der Innenraumluftqualität definiert und in der *DLL* umgesetzt. Bei Anpassungen des Systemnachweises im Bezug auf Sanierungen wurden die Änderungen im Vergleich zu Neubauten ausgearbeitet. Für die Ge-

sambewertung des Systemnachweises wurde der Ablauf im Detail definiert, so dass er in der *DLL* integriert werden kann. Um die Ergebnisse an realen Gebäuden validieren zu können, werden zurzeit 15 Fallbeispiele ausgewertet. Die Grundlage der Gesamtbewertung (Figur 1) ist die Methodik HERMIONE. Mit ihr ist es möglich, die zugrunde liegende quantitativen sowie qualitativen Kriterien des Systems gleich gewichtet nebeneinander zu stellen. Das Prinzip besteht aus einer Einstufung der Ergebnisse aller Teilkriterien in rot (nicht bestanden) und grün (gut bestanden) sowie teilweise ergänzt durch gelb (bestanden).



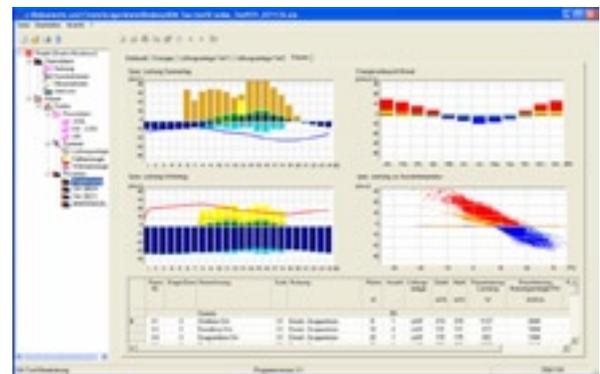
Figur 1: Übersicht über das Bewertungssystem des Systemnachweises (Intep – Integrale Planung). Die runden Symbole werden bei Ausschlusskriterien angewendet und zeigen entweder «erfüllt» oder «nicht erfüllt» an. Für die anderen (qualitativen und quantitativen) Kriterien wird ein Mindesterfüllungsgrad verwendet. Für die Erfüllung der Gesamtbewertung darf keiner der Bereiche negativ ausfallen.

Im Rahmen des Projekts **Bauen, wenn das Klima wärmer wird** [3], wird untersucht, wie der zusätzliche elektrische Energiebedarf bei den erwarteten 2 bis 3 °C wärmeren Sommer der nächsten 50 Jahre in der Schweiz in neuen und bestehenden Dienstleistungsbauten durch bauliche und technische Effizienzmassnahmen vermindert werden kann. Mit den im Bericht beschriebenen baulichen, anlagentechnischen und betrieblichen Massnahmen ist es möglich, den bis 2035 gegenüber 2005 zu erwartenden zusätzlichen Elektrizitätsbedarf von 1.9 TWh pro Jahr für Lüftungs- und Klimaanlage auch bei grösseren gekühlten Flächen und weiter steigenden Temperaturen mit kostengünstigen Mitteln vollständig zu kompensieren (Figur 2). Der Bericht ist im *Faktor Verlag* erschienen und kann unter www.faktor.ch bestellt werden.

Mithilfe des neu entwickelten **SIA Tool Klimatisierung** [4] (Optimierung und Erweiterung für SIA 382/1 und Minergie Nachweise) kann in einem Rechengang der Energiebedarf eines Gebäudes für Lüftung, Kühlung, Heizung, Be- und Entfeuchtung, Beleuchtung und elektrische Geräte berechnet werden (Figur 3). Zudem wird der Nachweis



Figur 2: Gesamter elektrischer Energiebedarf für Kühlung und Luftförderung. Balken links: Elektrizitätsbedarf bei heutigem Technologiestandard 1) heute, 2) 2035 bei gleich bleibendem Klima, und 3) 2035 bei erhöhter durchschnittlicher Temperatur. Balken rechts: 4) und 5) Elektrizitätsbedarf 2035, unter dem Einsatz von Effizienzmassnahmen.

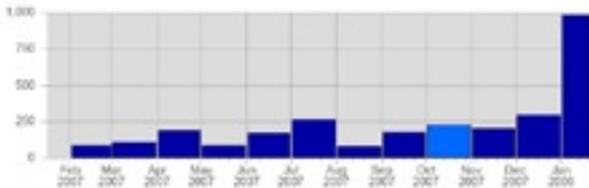


Figur 3: SIA-Tool: Darstellung der Projektwerte für die Dimensionierung der Raumsysteme.

gemäss SIA 380/4 für Lüftung und Klimatisierung ausgewiesen. Durch das vorliegende Projekt wurde das Tool erweitert und kann nun ohne zusätzlichen Aufwand für den Anwender die Anforderungen der neuen SIA 382/1 berechnen (bauliche Anforderungen an Sonnenschutz und Wärmespeicherfähigkeit sowie Voraussetzungen für eine aktive Kühlung). Ausserdem weist das Tool die für den MINERGIE-Nachweis benötigten Kennwerte aus. Das Tool ist seit September 2006 auf www.energycodes.ch als Testversion verfügbar und wird seit Februar 2007 vom SIA gegen Lizenzgebühren (300 CHF/a) vertrieben.

Der Start des Elektronischen Bauteilkatalogs www.Bauteilkatalog.ch (inkl. der französischen Version www.catalogueconstruction.ch) ist geglückt [5]. Aufgrund der intensiven Öffentlichkeitsarbeit findet der Elektronische Bauteilkatalog vermehrt Anwendung und konnte somit im Januar 2008 seine Besucherzahlen bzw. Downloads enorm steigern (Figur 4). Dem Internet-Benutzer stehen rund 120 Konstruktionen in unterschiedlichen Ausführungsvarianten zur Verfügung.

Der **Wärmebrückenkatalog für Minergie-P-Bauten** [6] ist eine Ergänzung zum bestehenden



Figur 4: Anzahl der Downloads von www.Bauteilkatalog.ch (Gespeicherte Seiten z.B. als PDF).

Wärmebrückenatlas (Bestellnummer 805.159d) des Bundesamts für Energie aus dem Jahre 2002. Zur Erreichung der Primäranforderung ist für Minergie-P-Bauten (und für Passivhäuser) ein U-Wert gegen Aussenklima von etwa 0.1 W/m²K notwendig. Der bestehende Wärmebrückenatlas deckt Konstruktionen bis zu einem U-Wert von 0.15 W/m²K ab, tiefere Werte fehlen. Deshalb basieren die ergänzenden Berechnungen auf einem U-Wert von 0.10 W/m²K bei Bauteilen gegen Aussenklima (Figur 5).

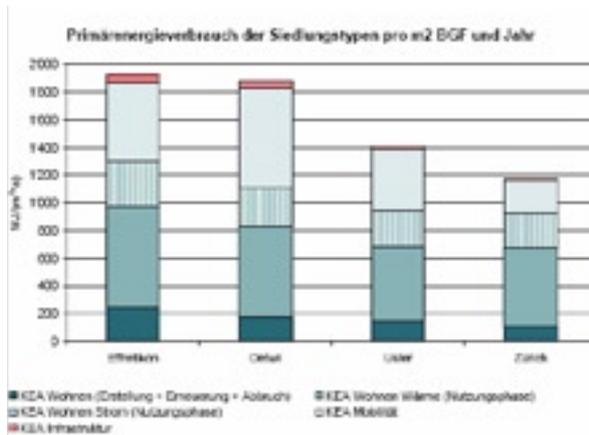


Figur 5: Rollladensturz; Nischenhöhe 30cm; Aussenwärmedämmung verputzt oder hinterlüfteter Fassadenbekleidung.

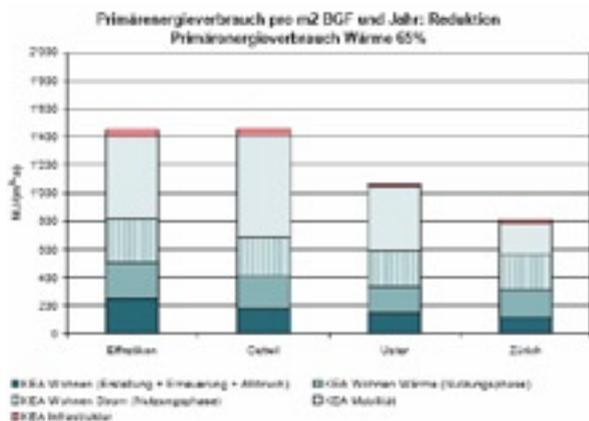
NACHHALTIGKEIT IN GEBÄUDE UND QUARTIER

Im Berichtsjahr wurden zwei Projekte zum Thema «Ressourcenrelevante Typisierung städtischer und ländlicher Wohnsiedlungen oder Quartiere unter Einbezug von Siedlungsinfrastruktur und siedlungsinduzierten Verkehrsleistungen» fertig gestellt. Das Projekt **Aspects énergétiques des quartiers urbains et des agglomérations rurales dans le canton de Neuchâtel** [7] zeigt die energetischen Auswirkungen verschiedener aktueller Modalitäten der Raumplanung anhand einer Fallstudie von acht Quartieren im Kanton Neuenburg. Diese geben Aufschluss über die Tendenzen in der Raumplanung der Kernstadt sowie im inneren und äusseren Agglomerationsgürtel. Der Energieaufwand für den Bau (Konstruktion, Ausbau), den Betrieb (Heizung, Wasser etc.) sowie die Mobilität (Pendelmobilität, Einkauf und allgemeine Mobilität) wurden berücksichtigt. Das Ergebnis zeigt, dass sich die Zentralitätsvariable nur leicht auf die Ökobilanz pro Person auswirkt. Dies bedeutet, dass die Ökobilanzen für die im inneren und äusseren Agglomerationsgürtel gelegene Quartiere vergleichbar ähnlich sind. Im zweiten Projekt **Energieaspekte städtischer Quartiere und ländlicher Siedlungen** [8] wurde

der gesamte Primärenergieverbrauch unterschiedlicher Wohnquartiere im Kanton Zürich, inklusiv Erschliessungs- und Entsorgungsinfrastrukturen, Primärverbrauch der Wohnungsinduzierten Mobilität einschliesslich Fahrzeugherstellung untersucht. Die Analyse basiert auf vier Fallstudien in weitgehend homogenen Wohnquartieren (Figur 6 und Figur 7).



Figur 6: Vergleich des gesamten Primärenergieverbrauches pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche und Jahr. KEA: Kumulierter Energieverbrauch.



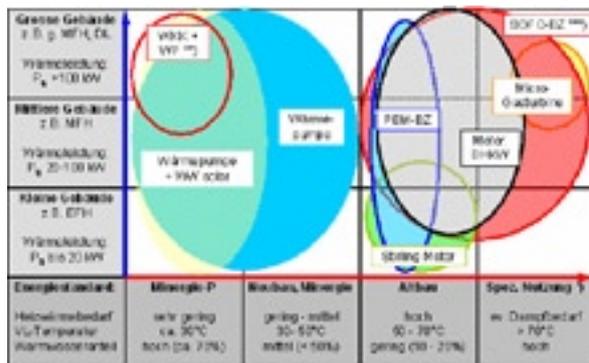
Figur 7: Situation mit einem gegenüber heute um 65% reduzierten Primärenergieverbrauch für Wärme. KEA: Kumulierter Energieverbrauch

Ein mehrjähriger Schwerpunkt des Programms lag in der Erarbeitung und Umsetzung von Strategien für eine **nachhaltige Quartierentwicklung** [9]. Dazu haben das Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), das Bundesamt für Wohnungswesen (BWO) zusammen mit dem BFE in vier Schweizer Städten mit lokalen Behörden und Institutionen zusammen Quartierentwicklungsprojekte durchgeführt. Im Dezember 2007 sind die Projekte anlässlich einer ganztägigen Veranstaltung an der HSW Luzern vorgestellt worden. Die Broschüre **Nachhaltige Quartierentwicklung – Spannungsfelder** kann beim BBL unter der Nummer 805.058d bestellt werden. In fünf Querschnittsthemen wird auf **Raumentwicklung und Mobilität, Ressourcen und Umwelt, Nachhaltigkeit und Investiti-**

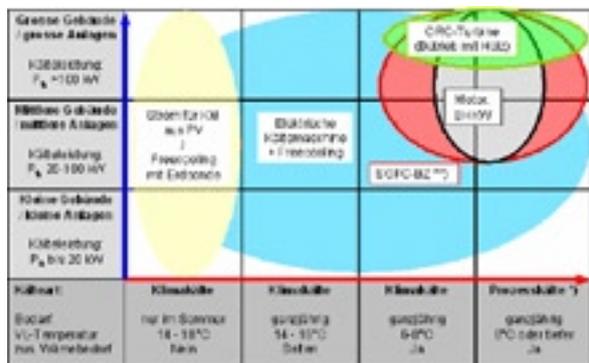
on, Bau und Gesellschaft, sowie Partizipation und Machbarkeit eingegangen.

Die Projekte **Stratégie pour une gestion durable de parc immobilier communal** [10] sowie **Die Wirkung von MuKE, Minergie und Minergie-P** [11] stehen kurz vor dem Abschluss.

Aufschluss über die optimalen Einsatzgebiete von WKK-Systemen sowohl aus technischer, ökologischer und wirtschaftlicher Sicht, zeigt das Projekt **Ökologische Bewertung neuer WKK-Systeme und Systemkombinationen** [12]. Für die Untersuchung wurden zur Differenzierung der Anwendungsgebiete fünf verschiedene Temperaturniveaus der Nutzwärme oder -Kälte unterschieden (6 °C, 14-18 °C, 30-40 °C, 60 °C, 80 °C). Damit wurden die Resultate auf unterschiedliche Anwendungen übertragen bzw. die Eignung einzelner Systemkombinationen für bestimmte Anwendungen hervorgehoben. Eine Anwendungsmatrix zeigt auf vereinfachte Art die optimale Anwendung von WKK-Anlagen, wobei diese verschiedene Anwendungsbereiche unterscheidet.



Figur 8: Günstige Anwendungsbereiche für verschiedene Gebäude-WKK-Systeme.



Figur 9: Günstige Anwendungsbereiche für die Kälteerzeugung mit verschiedenen WKK-Systemen.

GEBÄUDEHÜLLE

Nach mehrjähriger Forschungstätigkeit sind die fünf Projekte des Schwerpunkts vakuumisolierte

Dämmsysteme abgeschlossen worden. In idealer Weise haben Vertreter der Industrie, von Fachhochschulen und Ingenieurbüros praxistaugliche Lösungen entwickelt. Dank dem energie-cluster.ch ist eine rasche Umsetzung in Kursen und dadurch auch am Markt erfolgt.

Das Projekt **Entwicklung eines kompakten Fussbodenheizungselements mit integrierten Vakuumisulationspaneelen (VIP)** [13] wird nach knapp drei Jahren erfolgreich abgeschlossen. Am Ende wurde für nahezu alle auftretenden Probleme eine Lösung gefunden. Auch wenn das Produkt nicht alle ursprünglichen Zielvorgaben erfüllt, konnte eines der Hauptziele voll und ganz umgesetzt werden: Ein mechanisch vollständig geschütztes VIP mit hervorragenden Trittschalleigenschaften, welches für Anwendungen im Fussbodenbereich sehr geeignet ist. Während der kommenden 18 Monate wird im Rahmen eines weiteren Projekts die Entwicklung des VIP-Innen-drucks an sechs Paneelen mittels vorinstallierten Drucksensoren verfolgt. Parallel dazu werden auch die direkt angrenzenden Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Messungen sollen die Auswirkungen von wechselnden Temperaturen auf die Lebensdauer von Vakuumdämmungen beurteilt werden.

Mithilfe von Langzeitstudien wird im Projekt **Weiterentwicklung, Qualitätssicherung und Langzeitverhalten von VIP mit mechanischem Schutz (Vacucomp)** [14] ebenfalls die Lebensdauer bzw. Alterung von VIP gemessen und analysiert. Das Messprojekt Kühl-/Tiefkühlraum im EAWAG-Neubau Chriesbach (Bodendämmung) wurde erfolgreich installiert (Figur 10 und Figur 11). Die Messungen laufen planmässig und zeigen die gute Eignung von VIP für diese Anwendung. Über eine Gebrauchsdauer von 15 Jahren sind Alterungseffekte wärmetechnisch praktisch vernachlässigbar. Die Messungen im Flachdach Regensdorf wurden ebenfalls fortgeführt. Sie zeigen grössere Alterungseffekte, welche durch höhere Temperatur- und Feuchteeinwirkungen zu erwarten sind. Die bisherigen Ergebnisse bestätigen auch für diese Anwendung die Gebrauchstauglichkeit der VIP-Technologie, wobei die Alterung in Bemessungswerten zu berücksichtigen ist.

Abgeschlossen wurde auch das Projekt **Entwicklung eines Passivhausfassadenelements mit Vakuum-Dämmung** [15] für Niedrigenergiehäuser nach Minergie und Minergie-P Standard in Leichtbauweise. Als Variante zur mineralwollegedämmten Holzständerkonstruktion wurde in diesem Projekt eine Konstruktion mit Vakuum-Dämmung (VIP) entwickelt. Als Fazit des Projekts kann man sagen, dass der Einsatz von Vakuum-Dämmung technisch durchaus möglich und praktikabel ist, jedoch ist der Einsatz von geschützten VIP empfehlenswert. Wegen der heute hohen



Figur 10: Einbau der VIP Testfelder

Materialschicht	d, mm
Kies	30
Bituminöse Abdichtung (3 Lagen)	10
Schutzschicht (PE-Schaum)	7
VIP	20
Schutzschicht (PE-Schaum)	5
Wassersperre (bestehend)	10
Porenbeton (bestehend)	200

Figur 11: Schichtaufbau der Testanlage

VIP-Preise ist ein ökonomisch sinnvoller Einsatz von Vakuum-Dämmung aber nur bei einem sehr hohen Wert des zusätzlich nutzbaren Raumes gewährleistet. Die beiden Projekte **Bauelemente und Systeme mit VIP für Aussenwand und Dach** [16] und **Thermotragelemente aus hochfestem Faserverbundstoff und integrierten Vakuumisulationspaneelen (VIP)** [17] stehen kurz vor dem Abschluss.

Beim neu gestarteten Projekt **VIP Deklaration** [18] werden die notwendigen Hilfsmittel zur Berechnung der U-Werte und VIP-gedämmten Systeme erarbeitet. Ein Kernelement für diese Berechnung ist die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit der Vakuum-Paneele. Wichtigstes Ziel hierbei ist die Erarbeitung einer pränormativen Methodik zur Bestimmung von λ_D -Werten (*Lambda declared*), welche im SIA Merkblatt 2001 publiziert werden und für die Berechnung von U-Werten als verbindlich gelten (Wärmeschutznachweis SIA 380/1).

Im Projekt **Vakuumverglasung** [19] lag das Augenmerk im letzten Jahr beim neu entwickelten Kantenschutz (Randdichtung). Zusätzlich wurden die Berechnungen der thermischen und mechanischen Merkmale sowie ein Modell zur Druckbilanzberechnung des Vakuumglases erstellt, mit dem die Lebensdauer der Verglasung erprobt wird.

Um die sommerliche Überhitzung von Gebäuden möglichst gering zu halten wurden neue

Beschichtungen für transparente Gebäudeteile entwickelt und untersucht. **Neue optische Beschichtungen für transparente Gebäudeteile im Hinblick auf einen verbesserten sommerlichen Wärmeschutz** [20]: Der Ansatz besteht aus einem neuen Benetzungsmittel für das Silberwachstum auf SiO_2 . Hierbei wurde beobachtet, dass bei Raumtemperatur mit vorangehend aufgetragenen Submonoschichten aus Zinn eine frühere Koaleszenz des Films und eine Bildung glatterer Silberschichten erzielt wird. Ausserdem wurde gezeigt, dass die optischen Konstanten durch Parameter wie Druck, Gasmischungsverhältnissen, Pulsfrequenz, mit der das Magnetron betrieben wird und Substrattemperatur beeinflusst werden. Dies bedeutet, dass eine Beschichtung immer bei den selben optimalen Bedingungen durchgeführt werden muss. Des Weiteren wurden erneut Simulationen durchgeführt, um Schichtsysteme zur Realisierung der idealen Transmission τ_{\min} auch im industriellen Massstab durchzuführen. In einem erstem Versuch konnte gezeigt werden, dass eine Beschichtung mit einer Transmission, die der idealen Transmission sehr nahe kommt, auf einer industriellen Anlage möglich ist. Weiter wurde durch den ersten Versuch festgestellt, dass noch viele Veränderungen simuliert und dann umgesetzt werden müssen, damit die Farbwerte sowohl in der Transmission wie auch in der Reflektion erreicht werden.

Das Projekt **Energiebilanz Forum Chriesbach** [21] ist ein Vorzeigebauwerk für ein nach Kriterien der nachhaltigen Entwicklung gebautes Forschungs-, Schulungs- und Verwaltungsgebäude. Es demonstriert eindrücklich, wie funktionelle, ästhetische, ökologische und ökonomische Aspekte so integriert werden können, dass ein Ganzes entsteht, das wesentlich mehr als die Summe der Einzelteile ist. Für die Heizung und Kühlung kommt das Gebäude gemäss Planung mit 3.2 kWh/m²a zugeführter Endenergie aus und 1/3 des Strombedarfs wird mit einer Photovoltaikanlage auf dem Dach produziert. Das Gebäude verfügt in den Bürozone weder über ein konventionelles Kühl- noch über ein Heizsystem. Die internen Quellen (Mensch, Elektrogeräte, Licht) werden neben einer thermischen Solaranlage zur Wärmeerzeugung genutzt. Ein Erdregister sowie die automatische Nachtauskühlung gewährleisten auch in sehr heissen Sommern angenehme Temperaturen in den Komfortzonen.

Für die künstliche Beleuchtung werden in einem Bürogebäude bis zu 30% des Elektrizitätsverbrauchs eingesetzt. Anidolische Tageslichtsysteme sind eine vielversprechende fassadenintegrierte Möglichkeit den Anteil an künstlicher Beleuchtung zu reduzieren. Neueste Untersuchungen im Rahmen des Projekts **High performance Integrated Lighting Systems (Green lighting)** [22] zeigen, dass man eine ausreichende Beleuchtung mit ei-

ner installierten Leistung von weniger als 5 W/m² erzielen kann. In diversen Publikationen (CISBAT 2007, PLEA 2007) ist über die Forschungsarbeit berichtet worden.

Weil Gebäude direkt oder indirekt über 40% des Energiebedarfs in der Schweiz benötigen, ist eine wirksame Sanierung des Gebäudebestands bei Energiepreissprüngen sehr wichtig. Die schweizerische Beteiligung am *IEA-Projekt Demonstration Solar Retrofit* [23] diente zum einen, die Messlatte von Modernisierungen zu erhöhen, zum anderen internationale Erfahrungen zu gewinnen. In Europa gibt es eine Vielzahl von innovativen Wohnbausanierungen, die extrem wenig Energie für Heizung, Lüftung etc. benötigen. Diese Pilotprojekte führen zu einer bedeutenden Steigerung der Wohnqualität und passen sich optimal an die neuen Marktbedürfnisse an. Im Rahmen dieses internationalen Programms sollen durch eine systematische Analyse und Dokumentation der besten Projekte die möglichen Einsparpotentiale festgestellt werden. Ebenfalls einen Beitrag zur energieeffizienten und fortschrittlichen Bauerneuerung soll im *IEA-Projekt Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Buildings* [24] aufgezeigt werden. Hierbei liegt das Augenmerk auf Mehrfamilienhäuser (MFH) und Wohnsiedlungen, indem optimierte Sanierungsmodule entwickelt werden, die auf ein gesamtheitliches Renovationskonzept abgestimmt sind und welche rationell hergestellt und montiert werden können. Dabei soll der Energieverbrauch auf das Niveau Minergie bis Minergie-P (30-50 kWh/m²a) für Heizung, Kühlung und Warmwasser reduziert werden.

GEBÄUDETECHNIK

Die meisten Arbeiten des *IEA-Projekts Building Integrated Fuel Cell and other Cogeneration Systems* [25] wurden planmässig Ende 2007 abgeschlossen. Das Ziel war es, Simulationsmodelle für Brennstoffzellengeräte und anderen Mikro-WKK-Geräte für Wohngebäude zu entwickeln, diese anhand von Messungen zu verifizieren und zu kalibrieren und dann in Gebäudesimulationsprogramme zu integrieren damit verschiedenste Systeme und Fälle evaluiert werden können. Dadurch soll die Entwicklung von solchen Systemen vorangetrieben werden. Viele der Projekt-Berichte wurden fertig gestellt und veröffentlicht (www.cogen-sim.net), der zusammenfassende Schlussbericht folgt im März 2008. Im Projekt *Heizen und Kühlen mit erdgekoppelter Wärmepumpen* [26] wurde untersucht, wie sich Nutzen und Aufwand verhalten, wenn eine Wärmepumpenheizanlage mit Erdwärmesonde mit einer zusätzlichen Kühlfunktion ausgestattet wird. Einfach aufgebaute Systeme mit Wärmepumpe und Erdwärmesonde für den Heiz- oder Warmwasser-Betrieb sowie passiver Kühlung über die Sonde haben sich hierbei am besten bewährt. Die gleichzeitige Nutzung

der Kälte bei Warmwasser-Erzeugung lohnt sich im Vergleich zum Aufwand nicht. Wichtig ist, dass der Wärmetauscher zwischen Erdwärmesonde und Bodenheizung eine geringe Grädigkeit hat. Die Arbeiten mit dem Prototypen im Rahmen des Projekts *Open absorption system for cooling and air conditioning using membrane contactors* [27] konnten erst mit grosser Verzögerung fortgesetzt werden. Der Abschluss ist für Frühjahr 2008 vorgesehen.

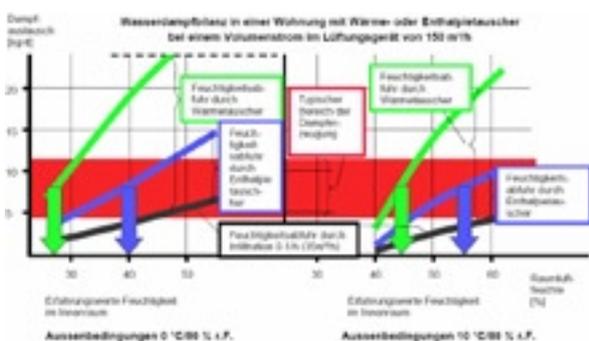
Das Projekt *Hocheffiziente Kühlsysteme für Gebäudesanierungen* [28] soll innovative Kühlsystemlösungen sowie deren Integration im Rahmen von Sanierungen aufzeigen. Es wurde eine Zusammenstellung von Raumabgabesystemen und Erzeugungssystemen erarbeitet und anhand von realisierten Beispielen analysiert. Die ersten Beispiele für die Analyse der Systemkombination wurden gefunden sowie ein Entwurf der Entscheidungsmatrix für Kühlsysteme erstellt. In einem weiteren Projekt *Passive cooling by night-time ventilation using climate responsive elements* [29] wurden im ersten Abschnitt verschiedene Klimata untersucht und auf das «*Climatic Cooling Potential*» (CCP) ausgewertet. Hierbei wurde festgestellt, dass ein erhebliches Potential in den nord- und osteuropäischen Ländern besteht. Jedoch darf die Klimaerwärmung nicht vernachlässigt werden, da aufgrund dieser das Potential verringert wird. Aufgrund dieses Problems werden Hybride Systeme bedingt nötig sein, um den thermischen Komfort zu gewährleisten. Die Untersuchungen im Projekt *Système de rafraîchissement par ventilation déphasée (Coolshift)* [30] zeigen, dass das System mit Phasenverschiebung auch unter extremen klimatischen Verhältnissen einem Lüfterdregister ebenbürtig ist.

Im Projekt *Réseau de distribution d'eau de lac et d'eau souterraine pour couvrir les besoins en rafraîchissement et en chaleur de l'environnement des bâtiments* [31] wird die Möglichkeit geprüft, See- und Grundwasser über ein Kältenetz zur Kühlung von Gebäuden zu nutzen. In einer ersten Phase sind verschiedene Bezüger identifiziert worden. Die technische Umsetzung in konkrete Projekte ist schwieriger als erwartet. Fortschritte wurden in der Berechnung der Kosten erzielt.

In der Schweiz werden pro Jahr gut 3000 Wohneinheiten mit wohnungsweisen Lüftungsanlagen (Komfortlüftungen) ausgerüstet, die Tendenz ist steigend (Quelle: www.energie-cluster.ch). Zusätzlich dürften in kleineren Dienstleistungs- und Schulgebäuden ca. 2000 Anlagen gebaut werden, die eine ähnliche Grösse haben. Das Projekt *Reduktion des Elektrizitätsverbrauch von Kleinlüftungsanlagen* [32] wurde in diesem Jahr gestartet. Ziel ist es, die Anforderungen an den spezifischen Energieverbrauch für die Luftförde-

zung der SIA-Normen und des SIA-Merkblattes 2023 einzuhalten bzw. den Zielwerten näher zu kommen, da diese in der Praxis praktisch nie erreicht werden. Ebenfalls im Herbst 2007 wurde das Projekt **Kompaktgeräte** [33] begonnen. Der Einsatzbereich solcher Kompaktgeräte ist grossenteils in Minergie-P Bauten (Heizen, Lüften und Warmwasser). Der kleine Heizbedarf ermöglicht eine Wärmeverteilung über die Zuluft. Das gesamte hydraulische Heizsystem kann somit entfallen und dies führt zu namhaften Kosteneinsparungen. Die Bedeutung des Projekts liegt darin, dass Erkenntnisse zum praktischen Betrieb solcher Geräte gewonnen werden.

Im Rahmen des Projekts **Feuchte in Niedrigenergiebauten** [34] wurde ein Vergleich zwischen der Feuchterückgewinnung, den bedarfsgeregelten Volumenströmen nach CO₂ und der Dampfbefeuchtung erstellt, um Auswirkungen auf den Energiebedarf der untersuchten Systeme und deren Kombinationen festzustellen. Hierbei wurden die heute auf dem Markt erhältlichen Kompaktlüftungsgeräte mit Feuchterückgewinnung experimentell verglichen. Ergänzend zu diesen Untersuchungen wurde im Projekt **Feldvergleich von Wärme- und Enthalpieübertragern in Kompaktlüftungsgeräten** [35] erfolgreich untersucht, dass Enthalpieübertrager gegenüber Wärmeübertragern in der Lage sind, das Feuchtigkeitsniveau zu erhöhen und somit zur Komfortsteigerung beitragen (Figur 12). Jedoch ist zu beachten, dass ohne interne Feuchtelasten und bei hohen spezifischen Luftmengen pro Person der Enthalpieübertrager – und damit auch ein anderes System, das auf Feuchteübertragung basiert – seine Wirkung nicht richtig entfalten kann.



Figur 12: Freigesetzte Wasserdampfmenge bei unterschiedlichen Aussenbedingungen nach [44].

In Schulen, Kirchgemeindehäusern, Kirchen und anderen Bauten mit unregelmässiger Belegung wird mangels besserer Hilfsmittel der Betrieb oft über fixe Zeitsteuerungen geregelt. Da aber aufgrund von Abend- und Ferienveranstaltungen eine fixe Zeitsteuerung ungeeignet ist, wird teilweise ganz auf diese einfachen Energiesparmassnahmen verzichtet. Um solche Energieeinsparungen

zu realisieren, wird im Projekt **Internetbasierte Einstellung von Zeitsteuerungen haustechnischer Anlagen** [36] mit Hilfe von kostengünstigen speicherprogrammierbaren Steuerungen ein System entwickelt, auf die mit einem *Web Browser* zugegriffen werden kann. Durch diese einfache Möglichkeit, Absenckprogramme kurzfristig zu deaktivieren, können die generellen Absenckzeiten stark ausgeweitet werden und somit Energie gespart werden. Um zur Verbesserung der Effizienz von Beleuchtungsanlagen beizutragen, wurden im Projekt **Nachrüstung von Beleuchtungen mit Bedarfssteuerungen** [37] verschiedene manuell ein- und ausschaltbare Beleuchtungssysteme auf bedarfsgesteuerte mit Funk-Präsenzmeldern versehene Systeme erfolgreich umgerüstet. Analysen der Einschaltzeiten der Beleuchtung über das Leitsystem zeigten (Pilotprojekt), dass die Steuerung einwandfrei funktioniert. Der Melder und der dazugehörigen Aktor wurden weiterentwickelt und sind ab Anfang 2008 im Handel erhältlich. Um optimale Steuerungen von Unterrichtszimmerlüftungen zu erzielen, wurde das Projekt **Elektrizitäts- und Wärmeeinsparungen durch CO₂-gesteuerte Lüftungen in Schulbauten** [38] abgeschlossen. Die Untersuchungen zeigen, dass die Anforderung «gute Luftqualität, kostengünstig und mit minimalem Energieverbrauch» nicht einfach zu erfüllen sind. Das Ziel, unter anderem drei verschiedenartig gelüftete Unterrichtszimmer zu untersuchen, wurde erreicht. Über das ganze betrachtete ist festzustellen, dass kein einziger Schulraum wirklich optimal im Sinne der Hauptanforderung belüftet wird.

Einen erfolgreichen Abschluss hat das Projekt **Environmental friendly high efficient light source** [39] genommen. Nachdem in den 1990er Jahren in den USA die ersten Experimente mit sich um die eigene Achse drehenden Leuchtkörper infolge Instabilitäten abgebrochen wurden, ist es dem schweizerischen Forschungsteam gelungen, den Leuchtkörper im ruhenden Zustand zum Leuchten zu bringen. Es wurde eine Lichtausbeute von über 80 lm/W erzielt. Für die Erfindung ist eine Patentierung eingereicht worden. Es werden nun



Figur 13: Prinzipschema von Egon (Quelle: Enecolo AG).

Investoren gesucht, um das Produkt zu kommerzialisieren.

Der Energieverbrauch eines Gebäudes ist in den wenigsten Fällen bekannt. Und wenn, dann wird er meistens nur rechnerisch ermittelt. Im Rahmen des Projekts (Vorstudie) **Energie im Gebäude online (Egon)** [40] (Figur 13) wurde untersucht, ob eine kostengünstige und aussagekräftige Messung des Energieverbrauchs innerhalb weniger Wochen möglich ist, um eine Energiekennzahl zu bestimmen.

MESS- UND DEMONSTRATIONSGBÄUDE

Im Projekt **SOLARIX-Wandheizsystem** [41] werden eine neu entwickelte transparente Wärmedämmung (TWD)-Fassade und vorgefertigte Betonelemente gemessen und ausgewertet. Solarix vereint ein Heiz- und Kühlsystem. Hierbei soll die Effizienz dieses Systems beurteilt werden. Aufgrund verschiedenster Probleme wird die Anlage im Frühling 2008 in Betrieb genommen. Somit können die Auswertungen im Laufe des Jahres realisiert werden. Ebenfalls neue Erkenntnisse (Praxisverhalten und Benutzereinfluss) sollen im Projekt **Cosy Place** [42] durch eine messtechnische Untersuchung eines Wohngebäudes nach MINERGIE-P Standard, das mit einer erdgekoppelten Wärmepumpe beheizt und im Sommer mit den Erdwärmesonden passiv gekühlt wird, gewonnen werden. Ist die Fussbodenheizung und

Erdwärmesonde für den Heizbetrieb ausgelegt, kann mit einem zusätzlichen passiven Kühlbetrieb die thermische Behaglichkeit im Sommer mit geringem Zusatzaufwand wesentlich gesteigert werden. Das Messkonzept der Anlage wurde bereits erarbeitet und implementiert. Folglich kann im Laufe des Jahres mit der Auswertung begonnen werden. Das Projekt **Wattwerk – 1. Plusenergie-Gewerbehaus** [43] in Bubendorf BL erhielt 2004 den europäischen Solarpreis in der Kategorie *Betriebe und Unternehmen* und 2005 den Schweizer Solarpreis. Das Wattwerk ist das erste Minergie-P-Gewerbegebäude, das mehr Energie produziert, als von dem Betrieb verbraucht wird. Als Gebäudeform wurde ein einfacher, gut gedämmter und kompakter Gebäudekörper gewählt. Die Parzelle wurde so gut wie möglich ausgenutzt und die Oberfläche so wenig wie möglich versiegelt. Durch den extrem kleinen Energieverbrauch – rund 10 Mal kleiner als bei vergleichbaren «normalen» Gebäuden – ist es möglich, mit den in der Fassade integrierten und auf dem Flachdach aufgeständerten Photovoltaik-Anlagen mehr Energie zu erzeugen, als für der Betrieb des Gebäudes und seine Benutzung nötig sind – und zwar für Heizung, Lüftung, Kühlung, EDV, Beleuchtung, Maschinen und sogar für Elektro-Mobile. Das Projekt wurde im März 2007 erfolgreich abgeschlossen. Informationen sind unter www.wattwerk.ch zu finden.

Nationale Zusammenarbeit

Begleitgruppe

Der Programmleitung steht eine Begleitgruppe zur Seite. Ihre Aufgabe ist es die Ausrichtung des Programms mit zu bestimmen und bei der Beurteilung grösserer, insbesondere international ausgerichtete Projekte mitzuwirken. Im Berichtsjahr haben vier Sitzungen stattgefunden, wovon deren zwei der Erarbeitung der Schwerpunkte des Programms 2008 – 2011 dienen.

Hochschulinstitute

Hervorzuheben sind die Kontakte mit Forschungsteams der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (Prof. Dr. Hj. Leibundgut und Prof. Dr. H. Wallbaum) sowie mit dem Forschungsteam von Prof. Dr. J.L. Scartezini an der École polytechnique fédérale de Lausanne. Es ist geplant die Zusammenarbeit mit diesen Forschungsteams künftig zu verstärken.

Partnerorganisationen

Eine erfolgreiche Zusammenarbeit besteht mit dem Verein **energie-cluster.ch** (www.energie-cluster.ch) im Rahmen der beiden Arbeitsgruppen

Vakuuminisulationspaneele (VIP) [13, 14, 15, 16, 17, sowie 18] und Komfortlüftung [32, 34, 35], sowie mit dem nationalen Kompetenznetzwerk **brenet** (*Building and Renewable Energies Network of Technology*, www.brenet.ch).

Gemeinsam mit der **Plattform Zukunft Bau** von *bauenschweiz* ist eine Denkschrift zum CO₂-optimierten Bauen herausgegeben und anlässlich der Herbst-Plenarversammlung von *bauenschweiz* vorgestellt worden.

Programmübergreifende Projekte

Gemeinsam mit den Bundesämtern **ARE** und **BWO** sind auf dem Gebiet der nachhaltigen Quartierentwicklung vier Projekte durchgeführt und im Dezember 2007 abgeschlossen worden (vgl. hierzu [9] sowie die gemeinsam herausgegebene Publikation *Nachhaltige Quartierentwicklung – Spannungsfelder*, welche beim BBL unter der Nummer 805.058d bezogen werden kann).

Gemeinsame Projekte im Bereich *nachhaltiges Bauen* werden auch 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, MeteoSwiss und EMPA, welches durch *swisselectric research* unterstützt wird, durch den Programmleiter vertreten.

Projekte der KTI im Energiebereich

In der Berichtsperiode sind von der KTI vier neue Projekte im Bereich Gebäude bewilligt worden:

- **Multifunktionales Bausystem aus GFK Zellkernsandwichen für tragende Gebäudehüllen** (EPFL/Scobaliti);
- **Energy Efficient Renovation of Buildings** (Empa/4B);
- **Neue Fugensysteme für den Holzbau** (FHBE/Renggli);
- **EnerBee** (FHZS/L&G).

Internationale Zusammenarbeit

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

Internationale Energie Agentur 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» an folgenden Projekten engagiert:

- **Energy Efficient Electric Lighting for Buildings** [39]
- **Solar & Conservation Renovation of Housing** [23]
- **Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Buildings** [24]

EU FP6/FP7

Im Zeitraum 1.1.2007 bis 31.12.2007 war das Bundesamt für Energie Mitglied des *European Research Area Networks for Buildings ERABUILD* (FP6_515790). ERABUILD verbindet Programmverantwortliche aus den verschiedenen Mitgliederstaaten und verfolgt das Ziel gemeinsamer Forschungsausschreibungen. Die Schweiz hat an einem *Call for tender* zum Thema »*Building Renovation and Modernisation in Europe – State of the art*« teilgenommen (Der Bericht ist unter <http://www.erabuild.net/> verfügbar). Die Schweizer Vertretung hat zudem an der Vorbereitung eines *Joint Call* zu *Sustainable Renovation* teilgenommen. Zur Zeit laufen Vorbereitungsarbeiten für eine Fortsetzung der Netzwerkaktivitäten.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Im Berichtsjahr wurden die Projekte zum Schwerpunkt Nachhaltige Quartierentwicklung, sowie jene zu vakuumisolierten Dämmsystemen erfolgreich abgeschlossen. Die Projekte zur nachhaltigen Quartierentwicklung haben einerseits interessante Initiativen in Basel, Luzern, Lausanne und Zürich ausgelöst, andererseits ist die Zusammenarbeit zwischen dem BFE, dem ARE und dem BWO erprobt worden. Die Ergebnisse sind an einer gemeinsamen Veranstaltung – durch Novatlantis organisiert – im Dezember 2007 in Luzern vorgestellt worden. Sehr erfolgreich waren auch die Projekte zur Vakuumdämmung. Sie brachten jeweils Forschungsinstitutionen und Industriepartner zusammen und haben bezüglich Kenntniszuwachs beim Einbau von VIP-Paneelen einen entscheidenden Schritt in Richtung Anwendungsfreundlichkeit getan. In der Folge hat der energie-cluster.ch mehrere Ausbildungstage organisiert, an denen die Projektnehmer sich aktiv beteiligt haben. Entscheidend zum Zuwachs des

Kenntnisstandes in der Gebäudetechnik – speziell im Bereich der Komfortlüftung – haben die Projekte an der Hochschule Luzern beigetragen.

Im vergangenen Jahr ist von der Programmleitung unter intensiver Begleitung durch die Begleitgruppe das Detailkonzept für den Zeitraum 2008 – 2011 vorbereitet worden. Dieses ist mit zwei übernommenen Auflagen von der CORE (*Commission fédérale pour la recherche énergétique*) am 18. Januar 2008 genehmigt worden. Es sind folgende Schwerpunkte vorgesehen:

- **Gebäude- und Siedlungskonzepte für eine 2000-Watt-kompatible Bauwerkentwicklung** (Erhaltung der architektonischen Gestaltungsvielfalt, passive Sonnenenergie- und Tageslichtnutzung);
- **Konzepte, Technologien und Planungswerkzeuge für die energietechnische Gebäudesanierung**;

- **Heizen, Kühlen und Lüften im 2000-Watt-kompatiblen Gebäude** (sanfte Kühlung, erdgekoppelte Wärmepumpen, etc.);
- **Energieeffizienzsteigerung im Stromverbrauch in Gebäuden** (elektrischer Energiebedarf für Kühlung der Aussenluft und Luftförderung, Gebäudeautomation, Beleuchtung, etc.);
- **Innovative Materialien und Komponenten für den Gebäudebereich** (Hocheffiziente Wärmedämmungen, Vakuumverglasung, schaltbare und regelbare Verglasungen, etc.).

Es ist geplant, 2008 zu bestimmten Schwerpunkten eine Ausschreibung zu starten. Zudem stehen für das kommende Jahr für den Gebäudebereich wieder P+D-Mittel zur Verfügung. Es wird darum gehen, die P+D-Projekte wieder anzukurbeln, nachdem die finanziellen Mittel in den vergangenen Jahren drastisch herunter gefahren wurden.

Seit Dezember 2007 hat das Programm einen neuen Webauftritt: www.bfe.admin.ch/forschung/gebäude [45].

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 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] B. Keller, (bkeller@hbt.arch.ethz.ch), Professur für Bauphysik, ETH, Zürich: **Weiterentwicklung der KLimaflächenmethode und –software zu erhöhter Praxistauglichkeit** (SB, Projektnummer: 100'025)
- [2] S.Lenel, (lenel@intep.com), Arbeitsgemeinschaft Intep/E4tech/heig-vd, Zürich, Lausanne, Yverdon: **Systemnachweis MINERGIE-ECO (Systemnachweis für nachhaltige Hochbauten)** (JB, Projektnummer: 101'463)
- [3] C.U. Brunner, (cub@cub.ch), Büro CUB A+B, Zürich: **Bauen, wenn das Klima wärmer wird** (SB, Projektnummer: 101'376)
- [4] M. Ménard (www.menard@lemonconsult.ch), Zürich, R. Gadola, (www.reto.gadola@hslu.ch), Horw: **SIA TOOL KLIMATISIERUNG (Optimierung und Erweiterung für SIA 382/1 und Minergie Nachweise)** (SB, Projektnummer: 102'343)
- [5] M. di Paolantonio, (m.dipaolantonio@holligerconsult.ch), Holliger Consult GmbH, Epsach: **Realisierung elektronischer Bauteilkatalog** (SB, Projektnummer: 102'328)
- [6] G. Notter, U.P. Menti, (umententi@hta.fhz.ch), HTA, Horw: **Wärmebrückenkatalog für Minergie-P-Bauten** (SB, Projektnummer: 102'260)
- [7] P. Vuilleumier, (pierrrene.vuilleumier@planair.ch), Planair, La Sagne: **Aspects énergétiques des quartiers urbains et des agglomérations rurales dans le canton de Neuchâtel** (SB, Projektnummer: 101'584)
- [8] W. Ott, (walter.ott@econconcept.ch), Econconcept, Zürich, **Energieaspekte städtischer Quartiere und ländlicher Siedlungen** (SB, Projektnummer: 101'592)
- [9] R. Stulz, (roland.stulz@novatlantis.ch), novatlantis, Zürich: **Projektkoordination Nachhaltige Quartierentwicklung** (JB, Projektnummer: 47'516)
- [10] D. Pittet (daniel.pittet@supsi.ch), SUPSI, Canobbio: **Stratégie pour une gestion durable de parc immobilier communal** (SB, Projektnummer: 101'311)
- [11] Ch. Zeyer, (christian.zeyer@ibe.ch), Zeyer Energiestadtberatung, Ostermundigen: **Die Wirkung von MuKE, Minergie und Minergie-P** (JB, Projektnummer: 101'694)
- [12] A. Primas, (alex.primas@bhz.ch), Basler&Hofmann AG, Zürich, **Ökologische Bewertung neuer WKK-Systeme und Systemkombinationen** (SB, Projektnummer:101'465)
- [13] P. Rutz, (paul.rutz@toblerag.ch), Tobler AG, Urdorf: **Entwicklung eines kompakten Fussbodenheizungselements mit integrierten VIP** (SB, Projektnummer: 101'435)
- [14] B. Arnold, Simmler, (bzre@zzwancor.ch), ZZ Wancor, Regensdorf: **Weiterentwicklung, QS und Langzeitverhalten von Vakuumisoliationspaneelen mit mechanischem Schutz (Vacucomp P)** (JB, Projektnummer: 101'478)
- [15] M. Jordi, (Martin.Jordi@renggli-haus.ch), Renggli AG, Schötz: **Entwicklung eines VIP-Passivhausfassadenelements** (SB, Projektnummer: 101'338)
- [16] G. Steinke, A. Binz, (a.binz@fhbb.ch), FHBB, Muttenz: **Bauelemente und Systeme mit VIP für Aussenwand und Dach** (SB, Projektnummer: 101'434)
- [17] O. Huth, (olaf.huth@empa.ch), Empa, Dübendorf: **Thermotragelemente aus hochfestem Faserverbundstoff und integrierten Vakuumisoliationspaneelen (VIP)** (SB, Projektnummer: 101'307)
- [18] M. Erb, (markus.erb@eicher-pauli.ch), Dr. Eicher + Pauli AG, Basel: **VIP Deklaration** (JB, Projektnummer: 102'134)
- [19] M. Koebel, (matthias.koebel@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Vakuumverglasung** (JB, Projektnummer: 102'341)
- [20] P. Oelhafen, (peter.oelhafen@unibas.ch), Universität Basel, Basel: **Neue optische Beschichtungen für transparente Gebäudeteile im Hinblick auf einen verbesserten sommerlichen Wärmeschutz** (JB, Projektnummer: 100'761)
- [21] H. Güttinger, (www.herbert.guettinger@eawag.ch), EAWAG, Dübendorf: **Energiebilanz Forum Chriesbach** (JB, Projektnummer: 102'374)
- [22] J.-L. Scartezzini, (jean-louis.scartezzini@epfl.ch), EPF LESO-PB, Lausanne: **High performance Integrated Lighting Systems (Green lighting)** (JB, Projektnummer: 101'352)

- [23] R. Hastings, (robert.hastings@freesurf.ch), AEU, Wallisellen: **IEA Task 37 Demonstration Solar Retrofit** (JB, Projektnummer: 101'968)
- [24] M. Zimmermann, (mark.zimmermann@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **IEA Building Annex 50 Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Buildings** (JB, Projektnummer: 101'902)
- [25] V. Dorer, (viktor.dorer@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Building Integrated Fuel Cell and other Cogeneration Systems (IEA/BCS Annex 42)** (JB, Projektnummer: 100'888)
- [26] Th. Afjei, (thomas.afjei@fhbb.ch), FHBB, Muttenz: **Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen** (SB, Projektnummer: 101'367)
- [27] M. Conde, (mconde.petit@mrc-eng.com), M. Conde Engineering, Zürich: **Open absorption system for cooling and air conditioning using membrane contactors** (SB, Projektnummer: 101'310)
- [28] P. Karlström, (petra.karlstroem@bhz.ch), Basler&Hofmann AG, Zürich: **Hocheffiziente Kühlsysteme für Gebäudesanierungen** (JB, Projektnummer: 101'464)
- [29] H. Manz, (heinrich.manz@empa.ch), Empa, Dübendorf: **Passive cooling by night-time ventilation using climate responsive elements** (JB, Projektnummer: 101'308)
- [30] P. Hollmüller, (Pierre.Hollmuller@cuepe.unige.ch), CUEPE Université de Genève, Genève: **Coolshift – Système de rafraîchissement par ventilation déphasée** (SB, Projektnummer: 101'339)
- [31] B. Matthey, (info@masai-conseils.com), Ingénieurs-Conseils SA, Montezillon: **Réseau de distribution d'eau de lac et d'eau souterraine pour couvrir les besoins en rafraîchissement et en chaleur de l'environnement des bâtiments** (SB, Projektnummer: 101'229)
- [32] R. Furter, (rudolf.furter@hlsu.ch), HTA, Luzern/Horw: **Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs von Kleinlüftungsanlagen** (JB, Projektnummer: 101'977)
- [33] D. Helfenfinger, (dominique.helfenfinger@hslu.ch), HTA, Luzern/Horw: **Kompaktgeräte** (JB, Projektnummer: 102'262)
- [34] B. Frei, (bhfrei@hta.fhz.ch), HTA Luzern, Horw: **Feuchte in Niedrigenergiebauten** (SB, Projektnummer: 101'843)
- [35] B. Frei, (bhfrei@hta.fhz.ch), HTA Luzern, Horw: **Feldvergleich von Wärme- und Enthalpieübertragern in Kompaktlüftungsgeräten** (SB, Projektnummer: 101'657)
- [36] A. Huber, (huber@iqjzh.com), Huber Energietechnik AG, Zürich: **Internetbasierte Einstellung von Zeitsteuerungen haustechnischer Anlagen** (JB, Projektnummer: 101'731)
- [37] M. Stalder, (m.stalder@energienetz.ch), Ingenieurbüro für Energietechnik, Rifferswil: **Nachrüstung von Beleuchtungen mit Bedarfssteuerungen** (JB, Projektnummer: 101'479)
- [38] W. Hässig, (haessig@sustech.ch), B+H, Zürich: **Elektrizitäts- und Wärmeeinsparungen durch CO₂-gesteuerte Lüftungen in Schulbauten** (SB, Projektnummer: 101'714)
- [39] G. Courret, (gilles.courret@heig-vd.ch), Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud, Yverdon: **Environmental friendly high efficient light source** (SB, Projektnummer: 101'078 & 101'080)
- [40] P. Toggweiler, (peter.toggweiler@enecolo.ch), Enecolo AG, Mönchaldorf: **Energie im Gebäude online (Egon)** (SB, Projektnummer: 102'242)

Liste der P+D-Projekte

- [41] P. Oesch, (p.oesch@twdmueller.ch), Gebr. Mueller AG, Bern: **P+D-Projekt mit Messungen SOLARIX- Wandheizsystem Solarix** (JB, Projektnummer: 100'404)
- [42] R. Dott, (ralf.dott@fhnw.ch), FHNW, Muttenz: **Sanfte Kühlung mit Erdwärmesonden im Minergie-P Wohngebäude Cosy Place** (JB, Projektnummer: 102'265)
- [43] H. Holinger, (heinrich@holinger-solar.ch), Holinger Solar AG, Liestal: **Wattwerk- erstes Plusenergie-Gewerbehaus** (SB, Projektnummer: 100'329)

Referenzen

- [44] Kriesi R., Frei B., Schnyder Ph.: Der **Enthalpie-Plattentauscher Comfohygro zur weiteren Verbesserung des Komforts im Innenraum**, 14. Schweizerisches Status-Seminar Energie- und Umweltforschung im Bauwesen, Tagungsband, Seiten 179 – 184, Zürich 2006
- [45] Internetseite des Forschungsprogramms: Mit dem Wechsel des Programmleiters erhält das Programm eine neue Internetadresse <http://www.bfe.admin.ch/forschung/gebaeude>, operativ seit Dezember 2007.

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

PROGRAMM VERKEHR / AKKUMULATOREN

Martin Pulfer

martin.pulfer@bfe.admin.ch



lightTram3 Hybrid der Carrosserie Hess, Bellach

Das hybride Forschungsfahrzeug (Prototyp) im Testbetrieb in der Region Zug. Energieeinsparung durch den Hybridantrieb: 20 – 30%; Reduktion der Schadstoffemissionen: ca. 50%.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Der **Verkehr ist mit 33% des Gesamtbedarfs der grösste Endenergieverbraucher in der Schweiz**. Dieses Verhältnis ist über die letzten Jahre weitgehend unverändert geblieben, wobei der Gesamtenergieverbrauch jedoch stetig zugenommen hat. Die Gründe für die Zunahme des Energieverbrauchs im Verkehrsbereich sind die folgenden:

- Steigende Bevölkerungszahl;
- Verbreitete Nutzung des Automobils in die Bevölkerung;
- Steigende Verkehrsleistung sowohl im Personenverkehr [Personen · km] wie auch im Güterverkehr [t · km];
- Vermehrte Staubildung;
- Verlängerte Freizeit.

Der Hauptverbraucher hierbei ist den Personewagen (PW). Obwohl dieser von der Automobilindustrie bezüglich Verbrauch, Emissionen, Sicherheit und auch Komfort laufend verbessert wird, bleiben diese Grössen jedoch stark konkurrenzierend. Gleichzeitig neigt das Kaufverhalten, unter dem Einfluss der Werbung und Beratung, zu immer leistungsstärkeren, grösseren und schwereren Fahrzeugen. Entsprechend liegt der Verbrauch der Neuwagenflotte 2006 mit 7.62 L / 100 km deutlich über der Zielvereinbarung AutoSchweiz – UVEK, die für das Jahr 2008 noch einen Verbrauch von 6.4 L / 100 km vorsieht.

Einen Ansatz zur Verbesserung dieser Lage liegt in der Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs zum motorisierten öffentlichen Verkehr (ÖV). Strategien, die diese Verlagerung anpeilen,

sind aber schwierig aufzustellen und verlangen eine Verbesserung der Attraktivität des ÖV. Es ist deshalb davon auszugehen, dass auch in der Zukunft der motorisierte Individualverkehr, mit aktuell 80% der Verkehrsleistung, die Hauptlast des Personenverkehrs tragen wird.

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

- Leichtere und / oder kleinere Fahrzeuge;
- Effizientere Antriebsstränge;
- Optimiertes Verhalten beim Fahrzeugkauf.

Das **Programm Akkumulatoren** erforscht die Möglichkeiten zur verbesserten elektrochemischen und elektrostatischen Energiespeicherung. Die Schwerpunkte liegen bei:

- der *Zebrabatterie*: System mit sehr hoher Energiedichte, nahe der Marktreife und einem weiterhin vorhandenen grossen Verbesserungspotential;
- den *Super-Caps*: Hochleistungskondensatoren mit einer sehr hohen Leistungsdichte (aber tieferen Energiedichte) und einer sehr langen Lebensdauer;
- den Blei-Akkumulatoren: bewährte, aber immer noch verbesserungsfähige und kostengünstige Batterien.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

VERKEHR, VERHALTEN UND GRUNDLAGEN

Ernst Basler + Partner, Zollikon, erstellen seit 2006 eine **Risikoanalyse zu alternativen Treibstoffen und Antrieben im Strassenverkehr** [1]. Ausgangspunkt der Arbeit ist die stattfindende Diskussion um Treibstoffe aus biogenen Rohstoffen (z.B. Biodiesel, Bioethanol) und Gas sowie von schadstoffarmen Antrieben (Brennstoffzellen, Elektro-, Hybridantriebe). Damit verknüpft ist die Frage, ob mit zunehmender Verbreitung dieser Treibstoffe und Antriebe auch eine Veränderung der Risikolandschaft verbunden ist. In der Analyse wird zwischen der Treibstoffversorgung und dem Einsatz der Treibstoffe und Antriebe unterschieden. So werden künftig an Stelle von Benzin und Diesel vermehrt andere Energieträger mit anderen sicherheitsrelevanten Stoffeigenschaften in grossen Mengen gelagert, mit der Bahn und auf

der Strasse transportiert und an Tankstellen umgeschlagen. Bei einigen alternativen Treibstoffen werden zudem ganz andere Versorgungssysteme genutzt, wie z.B. die Gasleitungen für Erdgas als Treibstoff. Beim Umschlag der Treibstoffe an der Tankstelle kommen zum Teil neue Lager- und Betankungssysteme zum Einsatz, die andere sicherheitsrelevanten Eigenschaften haben als herkömmlicher Flüssigtreibstoff. Mit der Verbreitung der neuen Antriebskonzepte in Fahrzeugen werden künftig auch ganz andere Systemkomponenten eine grössere Verbreitung erfahren, wie z.B. Hochdruck-Gastanks, Batteriesysteme oder Elektromotoren mit hohen Spannungen. Auch diese können eine Veränderung der Gefahren und Risiken im Strassenverkehr bedeuten.

Die Sicherheit der unterschiedlichen Treibstoffe wird in der Studie im Bereich der Versorgung

quantitativ ermittelt. Dabei kann auf bestehende Risikomodelle und Erfahrungen abgestützt werden. Die Risiken beim Einsatz in Fahrzeugen werden anhand einer formalen Gefahrenanalyse abgeschätzt. Dies beinhaltet eine Einschätzung von Häufigkeit und Schadenausmass zahlreicher Ereignisszenarien. Da hierfür weniger Datengrundlagen und Modelle vorliegen, fliessen in die Risikoermittlung vermehrt Erkenntnisse aus Experteninterviews und entsprechende Schätzungen ein. Als Ergebnis der Studie werden kollektive Risiken zur Versorgung und zum Einsatz der einzelnen Treibstoffe und Antriebe ermittelt. Um die zukünftigen Auswirkungen des vermehrten Einsatzes alternativer Treibstoffe und Antriebe für die Schweiz abzuschätzen, werden die Ergebnisse mit Hilfe von Szenarien zu Verbreitung der Treibstoffe/Antriebe hochgerechnet (Szenarien des BFE zu den Energieperspektiven 2035 [30]). Aufgrund der Gefahrenanalyse wird zudem auf eventuelle Schwachstellen und Ansatzpunkte für vertiefte Sicherheitsuntersuchungen hingewiesen.

Eine Standesinitiative des Kantons Bern fordert die Einführung eines **Bonus-Malus-Systems für den Autokauf** [2]. Im Auftrag des BFE untersuchte die Gruppe Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften des Instituts für Umweltentscheidungen (IED-NSSI) der ETHZ die Wirkung eines solchen Systems. Die Studie zeigt, dass bei einer Erhöhung der Automobil-Importsteuer von 4 auf 8% für alle Fahrzeuge (*Malus*), die energieeffizienten Fahrzeuge der Effizienz kategorien A und B mit einem *Bonus* gefördert werden können. Entsprechend würde der Verbrauch der Neuwagenflotte jährlich um 1.5% stärker abnehmen als ohne diese Massnahme.

Im Gegensatz zu Personenwagen sind Nutzfahrzeuge bezogen auf die Fahrzeugmasse mit einer wesentlich geringeren spezifischen Motorenleistung ausgestattet. Deshalb ist für Nutzfahrzeuge mit einer prozentual geringeren Verbrauchsreduktion durch die *Eco-Drive*-Fahrweise zu rechnen, als bei Personenwagen. Die **Simulationsstudie Eco-Drive für Heavy-Duty-Fahrzeuge** [3] des Instituts für Mess- und Regeltechnik (IMRT) der ETHZ untersuchte für verschiedene Nutzfahrzeugtypen die Wirkung von *Eco-Drive*. Mit der Methode der quasistatischen Simulation berechnete das Institut den Treibstoffverbrauch für mehrere Nutzfahrzeugtypen mit unterschiedlicher Beladung und verschiedene Verkehrssituationen (Innerorts, Überland, Autobahn). Dabei wurden einerseits die *Eco-Drive*-Massnahmen, aber auch die vorausschauende Fahrweise berücksichtigt. Die Hochrechnung ergab ein durchschnittliches Einsparpotential von 4.2% bis 5.9%. Diese Zahlen beziehen sich auf das technisch mögliche Einsparpotential. Mit einer Vergleichsfahrt Zürich – Bellinzona wurden diese Ergebnisse validiert. Die Vergleichsfahrt ergab exakt den gleichen Verbrauch wie die Si-

mulation. Das Institut beurteilt die Genauigkeit der Methode der quasistatischen Verbrauchssimulation auf 3%. Daraus wird geschlossen, dass die Anwendung der *Eco-Drive* Fahrweise auch auf schwere Nutzfahrzeuge ein signifikantes durchschnittliches Einsparpotential birgt.

Das Projekt **Hundert Umwelttaxis in der Pilotregion Basel** [4] ist eingebettet in das Vorhaben **2-kW-Gesellschaft – Novatlantis** des ETH-Bereichs. Dabei untersucht das PSI die Wirkung und das Potential von Erd- und Biogas als Treibstoff für Taxis. In einer Teilstudie zur Diffusions- und *Impact*berechnung wurde ein Vier-Phasen-Diffusionsmodell entwickelt. Dieses zeigt auf, dass eine Einführungsinitiative ein gezieltes *Monitoring* bedingt, damit wichtige Erfahrungswerte gesammelt und Stolpersteine frühzeitig erkannt werden können. Nebst Angaben über Kaufszahlen, sind Erfahrungswerte zu erheben über die Zufriedenheit mit dem Fahrzeug, der Tankstelleninfrastruktur, dem Fahrzeugangebot, Treibstoff-, und Wartungskosten, sowie Kundenzufriedenheiten. Diese können für die weitere Informationsstrategie gesammelt und zum richtigen Zeitpunkt weiter vermittelt werden. Ausserdem können falls nötig Fördermittel angepasst werden. Ein Misserfolg der Einführungsinitiative kann zu einem längerfristigen Imageschaden von umweltfreundlichen Taxis unter den Haltern führen. Szenarienrechnungen haben gezeigt, dass sich bei einer erfolgreichen Einführung kurz- aber vor allem langfristig wesentliche Einsparungen an CO₂- und Schadstoff-Emissionen in der Region erzielen lassen (Tabelle 1).

Jahr	2005	2010	2015	2020
Flottenbestand (680 Fahrzeuge)				
Erdgas Fahrzeuge	2	100	270	446
Diesel Fahrzeuge	475	405	286	164
Benzin Fahrzeuge	203	175	124	70
Jährliche Emissionseinsparungen				
CO ₂ (Tonnen / Jahr)	0	158	434	718
NO _x (Tonnen / Jahr)	0	1.7	4.5	7.5
Partikel (Tonnen / Jahr)	0	1.4	3.8	6.2
Akkumulierte Einsparungen				
CO ₂ (Tonnen)	0	300	1700	4600
NO _x (Tonnen)	0	4	19	49
Partikel (Tonnen)	0	3.5	16	41

Tabelle 1: Berechnete jährliche bzw. kumulierte Emissionseinsparungen bis 2020 bei einer erfolgreichen Einführung von umweltfreundlichen Erd- und Biogastaxis.

Zusammenfassend zeigen die Modell-Rechnungen, dass eine erfolgreiche Umstellungsinitiative eine dynamische Massnahme ist, welche

1. sofort Wirkung zeigt,
2. sofort Kosten einspart,
3. regional umsetzbar ist und
4. mittelfristig immer bedeutender wird.

Die Förderinitiative ist eine mittelfristige Massnahme, die über einen längeren Zeitraum hin konzipiert und begleitet werden muss, damit sie ihre volle Effektivität erlangen kann.

LEICHTBAU

Im Forschungsprojekt **Leichtbau im Automobil mit Hilfe von Bionik-Simulation und Verbundwerkstoffen** [5], das im September 2007 von der Firma *Georg Fischer GF* (Schaffhausen) gestartet wurde, stehen Markt- und Technologieabklärungen im Vordergrund. Zusammen mit der *Key Account Organisation* bei *GF Automotive* wurden die wichtigsten Automobilhersteller (*Original Equipment Manufacturers – OEMs*) in Deutschland und den USA zum Bedarf an Leichtbaukomponenten im Fahrwerk und in der Karosserie befragt. Das dabei festgestellte beachtliche Interesse und die gestiegenen Anforderungen an Leichtbaustrukturen im Rahmen der verstärkten CO₂-Diskussion führen zu Folgegesprächen im 1. Quartal 2008, die in noch konkreteren Entwicklungsprojekten münden sollen. Zusammen mit dem Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT) in Pfinztal wurde zudem ein Projekt zur Simulation eines Leichtbau-Chassis-Elementes begonnen. Die Resultate zeigen ein beachtliches Potenzial an Gewichts- und Kosteneinsparungen durch die Verwendung von lokalen Verstärkungen entlang der Kraftlinien. Weitere Optimierungen zusammen mit den OEMs sollen noch weitere Verbesserungen und eventuelle Integrationen weiterer Funktionen bringen. *GF* kann das *Know-how* und Personal eines in der Region tätigen Partners mit Erfahrungen in Leichtbaukonstruktionen und -berechnungen nutzen. Die Bioniksimulationen können auf bestehenden Systemen von *GF Automotive* durchgeführt werden.

Unter der Leitung von *Horlacher AG*, Möhlin entwickelt ein Projektteam die markenneutrale Fahrzeugplattform **LIVIO 21** [6]. Die Entwicklung zielt einerseits auf den Fahrzeugleichtbau und andererseits auf die Fussgängersicherheit ab. Das Projektteam besteht aus Vertretern der Schweizer Automobilzulieferindustrie (*Rieter Automotive*, *Festo*, *Quadrant*), den Fachhochschulen Nordostschweiz, und der *Winterthur Versicherung*. Das Fahrzeug-Design umfasst eine «elastische» Vorderseite, die mit zwei Airbags ausgestattet ist. Mit diesen Elementen kann die Aufprallenergie absorbiert werden. Während der obere Airbag den Aufprall des Fussgängers mindert, verhindert der untere Airbag das rotierende Wegschleudern des Körpers, das zum gefährlichen Sekundäraufprall auf der Strasse führt (Figur 1). Dieses Konzept ist in zahlreichen Crash-Tests erprobt und weiter entwickelt worden. In der Zwischenzeit arbeitet *BST*, Maulburg, Deutschland, einer der grössten Airbag-Produzenten Europas, im Projekt aktiv mit.



Figur 1: Ein Frontairbag mildert den Aufprall des Fussgängers bei einer Kollision mit einem Auto. Die neuartige Fixierung der Beine durch einen zweiten Airbag verhindert das Wegschleudern des Passanten.

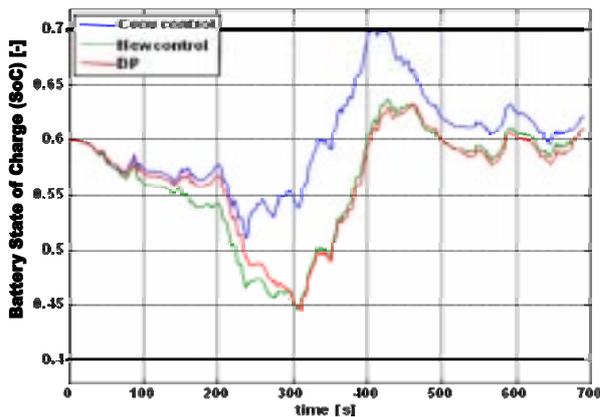
Das Institut für Mess- und Regeltechnik (IMRT) und das Autonomous Systems Lab (ASL) der ETHZ erforschen zusammen mit dem Laboratoire de Technologie des Composites et Polymères (LTC) der EPFL im Projekt **Mobility through Communication, Computation and Control (MC3)** [7] die Entwicklungsmöglichkeiten und die Sicherheit extrem leichter Fahrzeuge. Analog zum Flugverkehr wird angestrebt, Kollisionen zu verhindern resp. zu verunmöglichen. Ansätze hierzu sind modernste Mess- und Regeltechnik, Scanner, Radar und GPS-Systeme. Das Projekt ist im Herbst des Berichtjahres gestartet worden. In diesem visionären Grundlagenprojekt liegen deshalb noch keine konkreten Ergebnisse vor.

EFFIZIENTE ANTRIEBE

Hybride Antriebssysteme sollen einerseits die Teillastverluste von konventionellen Verbrennungsmotoren reduzieren, andererseits einen Teil der ansonsten verlorenen Bremsenergie rekuperieren. Dies setzt ein recht komplexes System voraus, bestehend aus Verbrennungsmotor, elektrischer Maschine, Leistungselektronik und Batterien.

Das Projekt **Kraftstoffsparende Antriebssysteme für Personenwagen** [8] des IMRT der ETHZ erforscht Ansätze zur Effizienzsteigerung bei Verbrennungsmotoren. Hybride Antriebssysteme können hier einen wesentlichen Beitrag leisten. Bis anhin werden diese mit heuristischen Steuer- und Regelalgorithmen betrieben. Diese werden meist für die vorgeschriebenen Homologationszyklen optimiert und erzielen deshalb im realen Alltag nur suboptimale Verbrauchseinsparungen. Insbesondere Höheninformation und Streckeninformation werden bis anhin nicht berücksichtigt. Das Projektteam arbeitet an Algorithmen, die einerseits zusätzliche Informationen zur zu fahrenden Strecke berücksichtigen, andererseits auch für unterschiedlichste Zyklen zumindest gute

Verbrauchseinsparungen erreichen. Dazu wird intensiv mit numerischen Werkzeugen gearbeitet. Die Methode des Dynamic Programming (DP) ermöglicht es, die global optimale Steuer-Strategie für einen definierten Zyklus zu finden. Es wurde eine Methodik erarbeitet, die es erlaubt, DP-Probleme so zu formulieren, dass sie anschliessend auf Mehrprozessor-Systemen möglichst effizient gelöst werden können. So können auch Parameterstudien, die z.B. bei Dimensionierungsfragen auftauchen, in nützlicher Frist (einige Tage Rechenzeit) gelöst werden.



Figur 2: Erste Simulationsergebnisse einer neuen Regelstrategie für Hybridfahrzeuge. Der Verbrauch von 6.47 L/100km mit der konventionellen Regelstrategie kann mit der neuen Regelstrategie, resp. der optimalen Lösung, um 3.9% auf 6.23 L/100km abgesenkt werden.

Bei der Herleitung von Regelalgorithmen für HEVs (*hybrid electric vehicles*) wird häufig auf Äquivalenzstrategien zurückgegriffen. Diese stellen die verbrauchte elektrische Energie in Relation zur chemischen Kraftstoffenergie. Im Projekt wurde deshalb auch eine Erweiterung dieser Strategien hergeleitet, welche die Abweichung von einem Soll-Ladezustand der Batterie bestraft. Dadurch wird erreicht, dass der Ladezustand bei fordernden Fahrmustern deutlich weniger in die Beschränkungen (gegeben durch die Lebensdauer-Anforderungen an die Batterie) läuft als bisher (Figur 2). Des Weiteren wurde gezeigt, dass prädiktive Strategien sich nur bei kleinen bis mittleren Batterien und Fahrprofilen mit deutlichen Rekupe- rationsphasen lohnen.

Im **Clever**-Projekt [9] hat sich ein Team aus der Abteilung Verbrennungsmotoren der EMPA und dem Institut für Mess- und Regeltechnik sowie dem Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme der ETH-Zürich zum Ziel gesetzt, ein Antriebssystem für einen Personenwagen zu entwickeln, welches 40% weniger CO₂ ausstösst als ein konventionelles, vergleichbares Benzin- fahrzeug. Gleichzeitig sollen die strengsten eu- ropäischen Emissionsgrenzwerte erfüllt werden.

Das Projekt wird von der *Volkswagen Forschung* sowie der *Robert Bosch GmbH* technisch, pers- onnell und mit Lieferung von Prototypenbauteilen unterstützt. Um die Projektziele zu erreichen, wer- den drei parallele Wege verfolgt:

1. Als Kraftstoff wird Erdgas eingesetzt. Erdgas hat eine hohe Klopfestigkeit, verbrennt ver- gleichsweise sauber und weist energiebezogen rund 25% weniger CO₂-Emissionen auf als Ben- zin oder Diesel. Aufbereitetes, z.B. aus Abfällen und Reststoffen gewonnenes Biogas lässt sich in beliebigen Anteilen zu fossilem Erdgas mischen, was die CO₂-Bilanz weiter verbessert.
2. Statt Benzinmotoren mit vergleichsweise ein- fachen Mitteln auf den Methanbetrieb umzubauen wird das Brennverfahren speziell auf Methan aus- gelegt. Dies beinhaltet eine komplette Betrachtung der Gemischbildung, der thermodynamischen Prozessführung sowie der Motorauslegung. Des- halb wird hier den Weg der Direkteinblasung in Kombination mit Hubraumverkleinerung und Auf- ladung (*Downsizing*) verfolgt.
3. Um – trotz vergleichbar kleinem Verbrennungs- motor – eine gute Fahrdynamik zu ermöglichen sowie um Bremsenergie zurückzugewinnen, wird ein elektrischer Pfad integriert (Hybridisierung).



Figur 3: Glühende Abgasanlage des Clever-Antriebs.

Im Jahr 2007 ist der Basismotor im Benzinbetrieb ausführlich vermessen worden. Diese Daten die- nen als Vergleichsgrundlage für spätere Projekt- schritte sowie als Validierungsgrundlage für die im Projekt eingesetzten Simulationswerkzeuge. Da- nach wurde der Motor auf Gas-Direkteinblasbe- trieb umgebaut. Erste Versuche sind erfolgreich durchgeführt worden (Figur 3). Parallel dazu ist der Motor thermodynamisch modelliert worden. Das Modell wurde mit den Messdaten validiert, und dient nun zur Auslegung der Aufladung so- wie zur Optimierung der motorischen Parameter (z.B. Ventilsteuerzeiten, Abgasrückführstrategien, Verdichtungsfestlegung). Um die verbrauchsopti-

male Dimensionierung der Hybrid-Komponenten (Elektromotor, Batterie) sowie die entsprechende Betriebsstrategie zu finden, ist ein flexibles Fahrzeugsimulationsmodell entwickelt worden. Mit Hilfe dieses Modells und numerischer Optimierung wird gezeigt, in welchen Fahrzyklen welche Konfiguration und welche Betriebsstrategie bezüglich Kraftstoffverbrauch optimal ist.

Im Projekt **HyCarPRO** [10] wird von der Firma **ESORO**, Fällanden, ein optimiertes Brennstoffzellen-System entwickelt und im Alltag transparent erprobt. Als Basis dient das von **ESORO** eigenfinanzierte Konzeptfahrzeug **HyCar**, ein *plug-in*-fähiger Technologieträger mit Schweizer **ZEBRA**-Batterie als Energiezwischenspeicher. 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 weniger als 30 kWh/100 km. Die Optimierung umfasst neben Leistung und Effizienz auch die Robustheit und Kosten des Systems. Als Nebeneffekt kann und soll das Fahrzeug auch zur Information und Demonstration der Technologie verwendet werden (Figur 4). Das Berichtsjahr stand ganz im Zeichen der Entwicklung und des Tests des Steuerungs- und Überwachungssystems. Grosse Bedeutung kam den automatischen Hoch- und Herunterfahr-Algorithmen, den transienten Zuständen, sowie der Überwachung der korrekten Funktion des Systems und des Steuerungssystems selbst durch eine Hardware-Komponente zu. Teil der Realisierung des Steuerungssystems war die Inbetriebnahme der Subsysteme (Kühlung, Luft, Wasserstoff). Dabei sind die Aktoren und Sensoren ins System eingebunden und die Regler parametrisiert worden. Probleme bereiteten die zugekaufte Elektronik zur Überwachung der einzelnen Zellspannungen der beiden *Stacks*. Das Gerät wird zwar serienmässig in stationären Anwendungen eingesetzt, die elektrische Schnittstelle (elektrischer Kontakt zwischen *Stack* und Elektronik) musste jedoch für den automotiven Gebrauch komplett neu entwickelt werden. Der Befeuchter hat zudem einen zusätzlichen Entwicklungsschritt vom Zulieferer erfordert und ist **ESORO** erst spät zu Verfügung gestanden. Es wird davon ausgegangen, dass das System im Winter 2007 / 2008 in Betrieb genommen werden kann und das Projekt im Frühling 2008 erfolgreich abgeschlossen wird.

FAHRZEUGE / VERKEHRSSYSTEME

Unter der Federführung von *gasmobil AG* und *Gasverbund Mittelland AG (GVM)*, in Zusammenarbeit mit der Automobilindustrie (*GM Suisse SA* und *Adam Opel GmbH*), ist ein **OPEL CORSA D 1,6 CNG** [11] als Prototyp entwickelt worden. Die seriennahe Fahrzeugstudie stellt die Kombination



Figur 4: HyCarPro als Demonstrator am Aktionstag Zürich Multimobil.

von Leistungsfähigkeit (94 PS) und sparsamen Verbrauch eines attraktiven und erschwinglichen Erdgasfahrzeugs in den Mittelpunkt. Mit dem **OPEL CORSA D 1,6 CNG** wird ein junges aufgeschlossenes, umweltbewusstes Kundensegment angesprochen. Die Reichweite des Fahrzeugs im reinen Erdgasbetrieb liegt über 500 km und der gemittelte Verbrauch beträgt 4,6 kg auf 100 Kilometer. Das Fahrzeug, dessen Treibstoff in Compositanks im Fahrzeugunterflurbereich gespeichert ist, ist am internationalen Autosalon Genf 2007 erfolgreich präsentiert worden.

Zusammen mit dem *Michelin*-Forschungszentrum in Givisiez entwickelt das *PSI Villigen* das Experimentalfahrzeug **Hy-Light** [12] weiter. Aktuell sind nur wenige Informationen öffentlich verfügbar. Die Radnabenmotoren sollen unter anderen sehr hohe Wirkungsgrade und spezifische Leistungen aufweisen.

Rinspeed, Zumikon, hat zusammen mit Partnern der Schweizer Automobilzulieferindustrie den Demonstrator **eXaxis** [13] entwickelt. Dieses Fahrzeug demonstriert die Synthese von Fahrzeugleichtbau mit einem Kraftstoff aus vorwiegend erneuerbarer Energie (Superethanol E85). Am internationalen Automobilsalon in Genf 2007 war **eXaxis** eines der meist beachteten Fahrzeuge der Ausstellung. Auch im Internet weckt das Fahrzeug grösstes Interesse: über eine Milliarde Besuche können verzeichnet werden. Die Berechnung des Fahrzeugverbrauchs mittels quasi statischer Simulation am *IMRT* der *ETHZ* ergeben im *NEFF*-Fahrzyklus einen Kraftstoffverbrauch von 5.65 L/100km beim Betrieb mit Benzin bleifrei 95. Mehrere Optimierungsschritte motor-, getriebe- und fahrzeugseitig reduzieren den Verbrauch auf 4.97 L/100km. Ausgehend von diesen Parametern ist das Verhalten von **eXaxis** beim Betrieb mit Bio-Ethanol E85 berechnet worden. Das er-

gibt einen Verbrauch von 6.73 L/100km E85, was einem Benzinäquivalent von 4.79 L/100km entspricht. Der höhere Zykluswirkungsgrad entsteht aufgrund der höheren Klopffestigkeit und der höheren Verdampfungswärme (Innenkühlung) des E85, welche zu einem grösseren Gebiet im Motorenkennfeld führt in welchem stöchiometrisch und mit verbrauchsoptimalem Zündwinkel gefahren werden kann. Das Potential zur Erzielung höherer Mitteldrücke/Leistungen im Vergleich zum Benzinbetrieb ist durch die höhere Oktanzahl gegeben. Im Fahrbetrieb mit Benzin erreicht der eXaxis bereits heute einen CO₂-Ausstoss, der die Richtlinien der EU ab 2012 unterschreitet. Im Betrieb mit E85 kann zudem die CO₂-Bilanz soweit verbessert werden, dass das CO₂-Niveau weit unter allen heute geforderten Grenzwerten liegt, dies unter der Annahme, dass der Ethanolanteil im E85 regenerativ erzeugt werden kann. In der gesamten Prozesskette (*Well-to-Wheel*) liegt der CO₂-Ausstoss im Betrieb mit E85 etwa 59% tiefer als mit Benzin. Hinsichtlich des Verbrauchs liegt die Differenz sogar bei 80%, wenn der Ethanol-Anteil des E85 als CO₂-neutral bewertet wird.

Das Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) der Hochschule Rapperswil hat mit *E-Motion* [14] ein innovatives Konzept für ein Leicht-Elektrofahrzeug entwickelt. Es handelt sich um einen Kleinwagen für zwei Erwachsene und zwei Kinder. Die Maximalgeschwindigkeit beträgt 80 km/h; die Reichweite ist abhängig von der Batteriekapazität und beträgt mit den eingebauten Batterien 50 km. Mehrere Semester- und Diplomarbeiten sind zur Verbesserung des Fahrzeugkonzeptes durchgeführt worden. Die Arbeiten sind anschliessend zu einem einfachen, funktionellen und fertigungsgerechten Gesamtkonzept zusammengeführt worden. Durch konsequenten Leichtbau ist die Fahrzeugmasse um einen Faktor 3 verglichen mit einem konventionellen Fahrzeug reduziert worden. Dafür sind verschiedenen Materialien und Fertigungsprozesse zur Anwendung gekommen. Bei der Konstruktion des Fahrzeuges ist darauf geachtet worden, dass das Fahrzeug auch bei kleinsten Stückzahlen kosteneffizient gefertigt werden kann. Die Konstruktion ist auf das Notwendigste reduziert, ohne dass sie die Funktionalität verliert. Ausserdem können die einzelnen Bauteile, Baugruppen und das Gesamtfahrzeug ohne aufwändige Fertigungswerkzeuge hergestellt werden. Das erste Prototypenfahrzeug ist fertig gestellt und wird nach einigen Nacharbeiten Anfang 2008 in Betrieb genommen. Die Planung für eine Serienproduktion durch einen Industriepartner ist im Gange. Mit diesem Projekt wird gezeigt, dass umweltfreundliche, individuelle Mobilität mit einer Fahrzeugmasse von 350 Kilogramm, statt den üblichen 1500 Kilogramm, möglich ist. Der Energieverbrauch des Fahrzeuges liegt bei 7 kWh / 100 km.

Pasol, Titterten, hat in Zusammenarbeit mit *REVA India* das elektrische Stadtfahrzeug **REVA** [15] so weiterentwickelt, dass das Fahrzeug die folgenden Kriterien erfüllt und damit Europatauglich ist:

- Die Maximalgeschwindigkeit wurde von 65 auf 85 km / h angehoben;
- Die Reichweite mit einer Batterieladung wurde von 50 bis 80 auf 100 bis 150 Kilometer verbessert;
- Die Beschleunigungszeit bis zu einer Geschwindigkeit von 50 km / h wurde auf 10 Sekunden reduziert.

Zur Verbesserung der Wartungsfreundlichkeit des Antriebssystems und der Batterien ist der Einbau der Elemente wesentlich verbessert worden. Auch das Sicherheitsniveau der Fahrgastzelle ist den europäischen Forderungen angenähert worden. Am Automobilsalon in Genf, März 2007, hatte das Fahrzeug eine hohe Beachtung erreicht. Auch die Verkaufsprognosen waren gut, bis der Batteriehersteller *MES DEA*, Stabio, sich dafür entschieden hat, mit der verwendeten Version der Zebra-Batterien nicht in die Serie zu gehen.

Als Fortsetzung resp. Umsetzung seiner früheren Projekte an der Hochschule Luzern entwickelt Herr Prof. W. Janach ein **Ultraleicht-Elektromobil** [16]. Das nur gerade 53 kg schwere, eiförmige Fahrzeug hat einen Energieverbrauch von 1.4 kWh/100km. Das Fahrzeug erreicht allerdings nur eine Maximalgeschwindigkeit von 25 km/h; eine Geschwindigkeit die aber in Ballungsgebieten als angemessen erscheint. An Ausstellungen wie der Swiss Plastics hat das Fahrzeug hohe Aufmerksamkeit geweckt.

Im Berichtsjahr ist die Finalisierung des **Coaster**-Pilotprojektes [17] im Focus aller Entwicklungstätigkeiten gestanden. Es sind auf der nunmehr fertig realisierten Schienenkonstruktion in Arosa (Streckenlänge 520 m, Höhendifferenz 150 m) die erforderlichen Tests und Systemuntersuchen im realen Umfeld erfolgreich durchgeführt worden (Tabelle 2). Zum heutigen Zeitpunkt ist die Anlage sicherheitstechnisch für den öffentlichen Personenbeförderungsbetrieb freigegeben (Figur 5). Trotz einigen technischen aber auch anderweitigen Schwierigkeiten ist der Beweis erbracht, dass das Coaster-Konzept in dieser Art erfolgreich einsetzbar ist, wodurch der Grundstein für weitere Anlagenrealisierungen gelegt ist. Eine Machbarkeitsstudie Coaster im Verkehrshaus der Schweiz (VHS) / Luzern zeigt einen positiven Befund.

Dolphin E-Bikes, Basel, entwickelt im Rahmen eines vom Amt für Umwelt der Stadt Basel und vom BFE unterstützten Projekts das E-Bike **Dolphin** [18] mehrheitlich neu. Die Leistungsfähigkeit und der Fahrkomfort können gegenüber dem bis-

Eingangsparameter	Soll / Maximalwert	Bemerkungen
Fahrtzeit	3,5 min	Kundenanforderung
Realisierbare Betriebsdauer	8 h	Kundenanforderung
Max. Geschwindigkeit	5 m/s	Kundenanforderung
Max. Beschleunigung	1 g (9,81 m/s ²)	Erfahrungswert
Max. Batteriedauerleistung	40 kW	Versuche Batterielieferant
Max. Motormoment	270 Nm	Getriebebegrenzung
Energieverbrauch	ca. 20 kWh / 100 km	

Tabelle 2: Die Coaster-Systemparameter.



Figur 5: Der Coaster im Einsatz beim Hotel Tschuggen, Arosa.

herigen Modell deutlich gesteigert werden. Diese Steigerung ist bei allen Anlässen und Ausstellungen vom Publikum klar bestätigt worden. Insbesondere das schnelle Modell «Dolphin express» vermag durchgehend zu begeistern. Auch die Ziele bezüglich Reduktion der Herstellungskosten sind deutlich übertroffen worden. 2008 soll das E-Bike auf den Markt gebracht werden (Figur 6).

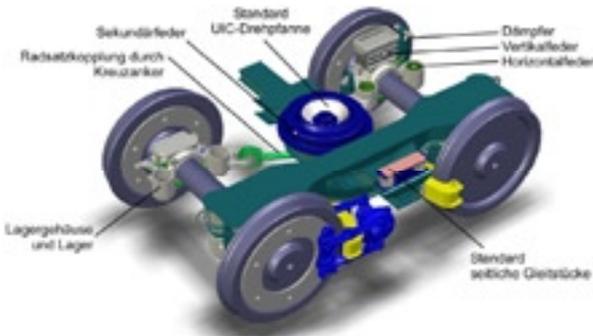


Figur 6: Das weiterentwickelte E-Bike Dolphin überzeugt durch Leistung und rückt durch den deutlich reduzierten Anschaffungspreis ins Interesse einer wesentlich breiteren Käufergruppe.

Die *Carrosserie Hess*, Bellach, entwickelt den vierachsigen Doppelgelenkbus mit Hybridantrieb **Light Tram 3** [19]. Das Fahrzeug ist für ca. 200 Passagiere ausgelegt. Der Hybridantrieb besteht aus einem Dieselaggregat und in Serie gelegten Elektromotoren. Die Elektrizität wird hierbei nicht in einem Akkumulator, sondern in einem *Stack* von Ultrakondensatoren zwischengespeichert. Diese elektrostatische Energiespeicherung vermag zwar nur ca. einen Drittel der Energie, wie eine gleich schwere Bleibatterie zu speichern, hat aber eine sehr deutlich längere Nutzungsdauer und ermöglicht einen wesentlich besseren Reku-perationswirkungsgrad. Das Konzept senkt den Energieverbrauch um 20 – 30% auf unter 70 L / 100 km im Stadtverkehr und reduziert auch die Schadstoff- und Lärmemissionen auf ca. die Hälfte dessen, was ein Bus gleicher Grösse mit einem Dieselmotor ausstossen würde. Das Projekt ist mit dem Preis Watt d'Or 2008, Kategorie Mobilität, ausgezeichnet worden.

Das Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETHZ entwickelte in Zusammenarbeit mit der Technische Universität (TU) Berlin und *Josef Meyer Waggon*, Rheinfelden, das Drehgestell **LEILA** [20] für Güterwagen der Bahn (Figur 7). Das Projekt wurde für den Aspekt Lärm vom BAFU und für den Aspekt Energie vom BFE mitfinanziert. Zentrale Probleme der Migration von Innovationen im Bereich von Güterwagen liegen in deren langen Lebenszyklen sowie der schwankenden Ertragskraft. Es wurde u.a. abgeklärt, welche Potentiale bei der Verwendung von radial einstellbaren Güterwagendrehgestellen und insbesondere bei der Verwendung des LEILA-Drehgestells im Hinblick auf die Energieeffizienz bestehen. Ein Anreizsystem in Form von Trassenpreisabschlägen für die Verwendung von verschleiss- und lärmarmen Drehgestellen wurde zur Anwendung gebracht. Aus den verschiedenen betrieblichen und regulatorisch bedingten Einsparungen wurde eine «*Return on Investment*»-Betrachtung (ROI) über definierte Nutzungszeiträume und Laufleistungsumfänge durchgeführt, um darzulegen, wie sich Amortisationszeiträume in teureres innovatives Rollmaterial in Abhängigkeit der gewählten Randbedingungen verhalten. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die monetarisierte Energieeinsparung auf Grund radial einstellbarer Güterwagendrehgestelle alleine nicht ausreicht, um die Mehrkosten des LEILA-Drehgestells gegenüber einem herkömmlichen Y 25-Drehgestell zu kompensieren. Um bei einem Preisszenario LEILA-Drehgestell = Y 25-Drehgestell + 100% den ROI in 15 Jahren zu erreichen, müssten die Fahrzeuge pro Jahr 90'000 km fahren und es müssten neben der Energieeinsparung ein unterstellter Trassenpreisabschlag, der gegenwärtige Lärmbonus in der Schweiz, eine Zins-

vergünstigung für nachhaltige Investitionen und Einsparungen beim Unterhalt in Rechnung gestellt werden.



Figur 7: Komponenten des LEILA-Drehgestells.
Quelle: TU Berlin, Josef Meyer AG, Rheinfelden.

AKKUMULATOREN UND ULTRAKONDENSATOREN (U-Caps oder S-Caps)

Superkondensatoren sind elektrochemische Speicherelemente mit hoher Leistungsdichte aber relativ geringer Energiedichte. In einer Zusammenarbeit des PSI, Villigen mit der Fachhochschule für Technik, Buchs, ist im Projekt **Integrated micro-Supercapacitor** [21] ein mikrostrukturierter Superkondensator als Starter und Kraftverstärker für eine Mikro-SOFC (*Solid oxide fuel cell*) evaluiert worden. Der Superkondensator basiert auf einer ineinander greifenden Kammstruktur für die beiden Elektroden in einer Ebene. Das aktive Elektrodenmaterial ist ein hydratisiertes Rubidiumoxid RuO_2 , der Elektrolyt besteht aus Schwefelsäure. Silizium Halbleiterscheiben sind entsprechend strukturiert und metallisiert worden. Das hydratisierte RuO_2 mit einer spezifischen Kapazität von 700 F/g ist synthetisiert und grundlegend mittels *X-Ray Photoelectron Spectroscopy* (XPS) und Leitfähigkeitsmessungen charakterisiert worden. Das Material zeigt eine gute Zyklenstabilität mit einer Kapazitätsverlust von 4% nach 600 Ladung/Entladung-Zyklen. Ein so mikrostrukturierter Superkondensator wurde elektrochemisch in einer Laborzelle charakterisiert und erbringt eine berechnete maximale Energie von 3.75 J und eine maximale Leistung von 3 W in einem Volumen von 3 cm^3 . Es wird erwartet, dass die Leistungsdichte durch Optimierung der Leitungswiderstände noch deutlich verbessert werden kann. Die elektrochemische Stabilität der Metallisierung (Pt auf Cu) der Mikrostruktur ist noch unbefriedigend. Als mögliche Alternative ist ein Dünnschicht-Superkondensator basierend auf Kohleelektroden mit einem organischen Elektrolyten erstellt worden, der eine maximale Energie von 3.7 J und eine maximale Leistung von 3 W in einem Volumen von 0.7 cm^3 erbringt.

Im Projekt **E-Bike Reichweitentest** [22] von *Schneider Communications*, Ottenbach, sind im Berichtsjahr die auf dem Schweizer Markt eingeführten E-Bikes getestet worden. Praktisch alle Fahrzeuge verfügen heute über leistungsfähige Lithium-Ionen-Batterien, die im Alltagsgebrauch kaum an ihre Grenzen stoßen. Deshalb ist entgegen dem Projekttitle die Frage nach der Reichweite in den Hintergrund gerückt. Vielmehr wird versucht, mit multivariaten Methoden ein Werkzeug zu entwickeln, das Händler und Kunden dazu helfen soll, das für eine gegebene Anwendung und Topographie und auf die Konstitution des Kunden optimal zugeschnittene Bike zu identifizieren.

Zum Abschluss des Projektes **TOHYCO-Rider** (TR) [23a] der Hochschule Luzern ist das Fahrzeug, das einzig Ultrakondensatoren als Energiespeicher benutzt, an einer Sonderausstellung im Verkehrshaus der Schweiz im Einsatz gestanden (Figur 8). Im Rahmen dieser Ausstellung haben die Museumsbesucher an vier Tagen pro Woche eine Fahrt im TR-Bus erleben können. Die Betriebsdaten sind während diesem Versuchsbetrieb aufgezeichnet, analysiert und ausgewertet worden. Die Auswertungen zeigen, dass die Rückgewinnung der Energie in die TR-Bus-Kondensatoren im Mittel eine Energieersparnis von 25% ermöglicht. Bei einem sehr harten «Stop & Go»-Betrieb (was typisch für den Innenstadverkehr ist) liegt der Prozentanteil sogar höher. Die vorliegenden Daten sind auch einem virtuellen Einsatz von verschiedenen Akkumulatoren gegenübergestellt worden. Dabei sind die 3 Szenarien «Schnellladung der Batterien, wie S-Caps in drei Minuten», «Nachladen an Endstationen gemäss Leistungsdichte Batterien mit Peukertkurve» sowie «Nachladung am Tagesende» untersucht worden. Keines dieser drei Szenarien kann mit der S-Cap Lösung konkurrenzieren. Szenario 1 ist, ohne die Batterien massiv zu schädigen, unmöglich. Szenario 2 verlangt eine Überdimensionierung der Batterien und Szenario 3 bedeutet die Mitnahme des Tagesbedarfs an Energie, was bei den verfügbaren spezifischen Energiedichten der Akkumulatoren zu Problemen mit den Achsenlastgrenzen führt.



Figur 8: Der induktiv aufgeladene TR-Rider vor dem VHS in Luzern.

Micromobility [23b] stellt ein im Berichtsjahr fertig entwickeltes *Kickboard* der HTI Luzern dar. Das *Kickboard* verfügt über einen elektrischen Antrieb, der von S-Caps gespeist wird. Diese sind in die Lenkersäule integriert. Für den Betrieb des *Kickboards* ist die Regelung mit der Hallsensor-Rückmeldung der Radnabenmotoren erweitert worden, damit die Ist-Drehzahl jederzeit erfasst werden kann. Die S-Cap Beschaltung läuft zufriedenstellend und erlaubt einen hinreichend schnellen Ladungsausgleich. Bei Überspannungen an den S-Caps wird die Rückspeiseleistung reduziert. Die neue Motorensteuerung ist getestet und nach der Behebung einiger Steuerungsfehler in Betrieb genommen worden.

Das Ingenieurbüro *Eisenring*, Niederuzwil, erarbeitet einen Statusbericht **Akkumulatoren für Traktionssysteme in Hybrid- und Elektrofahrzeugen** [24]. Der Bericht wird eine Übersicht über die technischen und kommerziellen Aspekte, die Einsatzmöglichkeiten sowie Beispiele aus indus-

trialisierten, Schwellen- und Entwicklungsländern präsentieren.

Das Projekt **Plug-in Hybrid** [25] von ENCO, Bubendorf, ist vom BFE-Programm Netze mitfinanziert worden. Es untersucht die Einsatzmöglichkeiten von Hybridfahrzeugen, mit einer grösseren Batterie bestückt, für eine dezentrale Energieversorgung oder zumindest für eine verbesserte Versorgungs- resp. Netzwerksicherheit. Kernelemente dieses auch als «*Vehicle to grid*» (V2G) bezeichneten Konzepts sind Hybrid-Fahrzeuge, welche im Elektrobetrieb grössere Strecken bewältigen können (mehr als 40 km gegenüber heute 2.5 km). Gleichzeitig verfügen sie über ein bifunktionales Ladegerät und können dadurch einerseits Energie aus dem Netz für die Fortbewegung beziehen und andererseits diese bei Bedarf als Regelenergie auch wieder ins Netz abgeben. Dies bedingt leistungsfähige Ladestationen und ein rasches Kommunikationssystem zwischen Netz und den hybriden Fahrzeugen.

Internationale Zusammenarbeit

Das Programm **Hybrid and Electric Vehicle Technologies** der Internationalen Energieagentur (IEA) befasst sich mit elektrischen Antriebstechnologien für den motorisierten Verkehr. Diese bestehen aus Kombinationen des Elektromotors mit verschiedenen Speichermedien (Akkumulatoren und / oder S-Caps), Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen. Im Projekt **Information Exchange** [26a] können Projekte und Programme verschiedener Länder direkt untereinander verglichen werden. Im Jahr 2007 setzte sich der globale Trend zur «*plug-in*» Hybrid-Technologie fort. Noch gibt es viele Wissenslücken. *Toyota* evaluiert daher zusammen mit *Électricité de France* die Kundenbedürfnisse eines *plug-in*-Hybridfahrzeugs (PHEV). Dazu hat die japanische Firma 15 «konvertierte» *Prius*-Exemplare zur Verfügung gestellt, in denen der «parallele» Teil mit einer zusätzlichen, kleinen NiMH-Batterie ausgebaut worden ist. Entscheidend ist die Frage der rein elektrischen Reichweite. Beachtenswert ist der Umstand, dass das Forscherteam neben der Fahrzeugentwicklung auch die Marktakzeptanz untersucht. Ein Faktor, der bei der Markteinführung des Elektrofahrzeugs leider vernachlässigt wird. Im Batteriesektor konzentrieren sich Forschung, Entwicklung und Produktion auf Li-Ion-Batterien mit unterschiedlicher Chemie und die Einbindung von S-Caps in ein Gesamtspeichersystem.

Das Projekt **Electric two wheeler** [27] ortet und analysiert die Hindernisse zur Markteinführung und -durchdringung von E-Bikes und E-Scootern und entwickelt und erprobt Massnahmen, um diese zu überwinden. Die internationale Zusammenarbeit ermöglicht die Berücksichtigung von

länderspezifischen Unterschieden. Damit kann eine weltweite nachhaltige Marktetablierung von Elektro-Zweirädern unterstützt werden. Mit den Markterfolgen von E-Bikes in diversen Ländern und mit der Ankündigung von viel versprechenden E-Scooter-Modellen (Figur 9) ist das Interesse am Projekt gewachsen.



Figur 9: *Quanta*: Leistungsstarker Schweizer E-Scooter beim Test an einer *NewRide Road Show*.

Das neu gestartete Projekt **Market Deployment of Hybrid&Electric Vehicles: Lessons Learned** [26b] untersucht die Gründe, weshalb die Elektrofahrzeugmodelle, die in den 1990er Jahren auf dem Markt gekommen sind, wenig Erfolg erzielt haben. Dazu werden Vertreter von Fahrzeugherstellern und Komponenten sowie Leute des Marketings befragt.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Im Berichtsjahr sind wichtige Resultate erzielt worden. Eines sei speziell erwähnt: Die Energieverbrauchssenkung von knapp 4% bei Hybridfahrzeugen durch eine neue Regelstrategie des Institutes für Mess- und Regelungstechnik (IMRT) der ETHZ. Diese Einsparung benötigt keine motorischen Änderungen, sondern einzig die Anwendung der Regelstrategie. Da in modernen PW sehr hohe Rechnerleistungen installiert sind, ist die Massnahme einfach umsetzbar. Daneben sei noch auf die erfolgreiche Umsetzung des Projekts *Energiemanagement System* der Hochschule für Technik und Informatik (HTI) Bern/Biel hingewiesen. Das Projekt ist für Fahrzeuge entwickelt worden; nun wird es für mobile, batteriebetriebene

Kaffeemaschinen von *Lavazza / Leclanché* (Batterie) in den IC-Zügen der SBB genutzt.

Die ökonomische Wirkung des Forschungsprogramms ist beachtlich: Mit den vom BFE geförderten Projekten und daraus entstandenen heutigen Produkten wird in der Schweiz jährlich ein Umsatz von weit mehr als 120 Mio. CHF erzielt. Auch für das Jahr 2008 dürfen einige Patentanmeldungen und neue Produkte erwartet werden. Die gute Zusammenarbeit der Forscher untereinander, mit der Politik, den Medien und der Industrie wird weiter gepflegt. September 2008 ist eine Forschungstagung des Bereichs geplant.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 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] Ch. Fermaud, N. Holthausen (charles.fermaud@ebp.ch), EB+P, Zollikon: **Risikoanalyse zu alternativen Treibstoffen und Antrieben im Strassenverkehr** (JB), <http://www.ebp.ch>.
- [2] P. de Haan, (dehaan@env.ethz.ch), ETH-Zürich: **Bonus-Malus-System für den Autokauf** (SB Projekt 101'215, <http://www.ethz.ch>).
- [3] C. Onder (onder@imrt.mavt.ethz.ch), ETH-Zürich: **Simulationsstudie Eco-Drive für Heavy-Duty-Fahrzeuge** (SB Projekt 102'208), <http://www.ethz.ch>.
- [4] S. Ulli (silvia.ulli@psi.ch) St. Lienin, (stephan.lienin@sustainserv.com), sustainsurv, Zürich: **HUT – Hundert Umwelttaxis für die Region Basel** (SB Projekt 101'025), <http://www.novatlantis.ch>.
- [5] 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>.
- [6] M. Horlacher, (thomas.efler@bluewin.ch), Horlacher Möhlin: **Livio21**, (JB), <http://www.horlacher.com>.
- [7] L. Guzzella (guzzella@imrt.mavt.ethz.ch), R. Siegart, ETH-Zürich, Y. Leterrier EPF-Lausanne: **Mobility through Communication, Computation and Control (MC3)**, <http://www.ethz.ch>.
- [8] L. Guzzella, C. Onder, (guzzella@imrt.mavt.ethz.ch), ETH-Zürich: **Kraftstoffsparende Antriebssysteme** (JB) <http://www.ethz.ch>.
- [9] Ch. Bach, (christian.bach@empa.ch), P. Soltic, (patrick.soltic@empa.ch), EMPA Dübendorf: **Clever** (JB), <http://www.empa.ch/abt137>.
- [10] S. Camenzind (stefan.camenzind@esoro.ch), Esoro, Fällanden: **HyCarPRO** (JB), <http://www.esoro.ch>.
- [11] K. Schmidlin (kurt.schmidlin@gvm-ag.ch), Gasverbund Mittelland, Arlesheim: **Opel Corsa D 1.6 CNG** (SB Projekt 101'525), <http://www.erdgasfahren.ch>.
- [12] P. Dietrich (philipp.dietrich@psi.ch), PSI, Villigen: **Hy-Light**, www.psi.ch.
- [13] F. Rinderknecht (fmr@rinspeed.com), Rinspeed, Zumikon: **eXaxis** (SB Projekt 101'799), www.rinspeed.com.
- [14] M. Henne (markus.henne@hsr.ch), Hochschule Rapperswil, Rapperswil: **Ultraleicht-Elektromobil E-Motion** (JB), <http://www.iwk.hsr.ch>.
- [15] P. Schweizer (pschweizer@pasol.ch), Pasol, Titterten: **REVA EURO** (SB Projekt 101'348), <http://www.pasol.ch>.
- [16] W. Janach (wjanach@gmx.ch), **Ultraleicht-Elektromobil** (JB).
- [17] P. Matt (philipp.matt@brusa.biz), Brusa, Sennwald: **Coaster** (JB), <http://www.brusa.biz>.
- [18] M. Kutter (info@dolphin-ebike.ch), Dolphin, Basel: **Dolphin** (SB Projekt 101'981), <http://www.velocity.ch>.

- [19] H.-J. Gisler, (hans-joerg.gisler@hess-ag.ch), Carrosserie Hess, *Bellach: lighTram3 Hybrid* (SB Projekt 101'800), <http://www.hess-ag.ch>.
- [20] J. Wichser (wichser@ivt.baug.ethz.ch), ETH, *Zürich: LEILA* (SB Projekt 101980), <http://www.ethz.ch>.
- [21] R. Kötz (ruediger.koetz@psi.ch), Paul Scherrer Institut, *Villigen: Integrated micro-supercapacitors* (SB Projekt 100'260), <http://www.psi.ch>.
- [22] B. Schneider (info@schneidercom.ch), Schneider Communications, *Ottenbach: E-Bike-Reichweitentest* (JB), <http://www.schneidercom.ch/>.
- [23] V. Härrli, (vyhaerri@hta.fhz.ch), HTA-Luzern, *Horw: a) TOHYCO-Rider Kleinbus* (SB Projekt 101'571), • b) *Micromobility* (SB Projekt 101'958), <http://www.hta.fhz.ch>.
- [24] M. Eisenring (Eisenring@bluewin.ch), Ingenieurbüro Eisenring, *Niederuzwil: Akkumulatoren für Traktionssysteme in Hybrid- und Elektrofahrzeugen* (JB).
- [25] R. Horbaty (robert.horbaty@enco-ag.ch), ENCO, *Bubendorf: Plug in Hybrid* (SB Projekt 102'205), www.enco-ag.ch.
- [26] S. Kleindienst-Muntwyler (info@solarcenter.ch), Solarcenter Muntwyler, *Zollikofen: a) Information Exchange* (JB) • b) *Lessons Learned* (JB), <http://www.ieahev.org>.
- [27] U. Schwegler, (ursschwegler@bluewin.ch), e'mobile, *Fischingen: Electric Two Wheeler* (JB), <http://www.e-mobile.ch>.

Referenzen

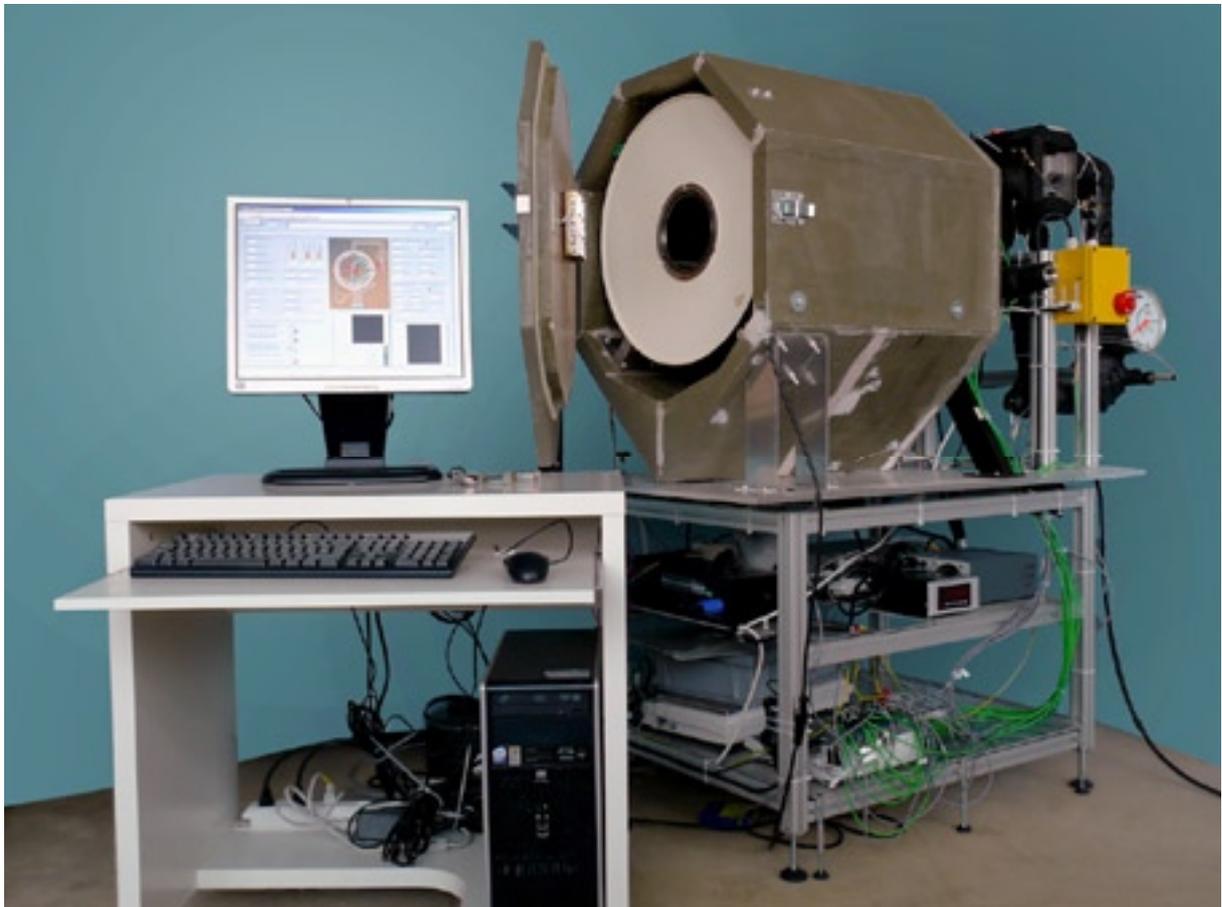
- [28] M. Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch) BFE, *Bern: Programme Verkehr und Akkumulatoren / Supercaps 2004 – 2007*, <http://www.bfe.admin.ch/themen/00507/00509/>.
- [29] Eidg. Energieforschungskommission CORE, *Bern: Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007*, download unter: <http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/>.
- [30] Bundesamt für Energie, *Bern: Die Energieperspektiven 2035 – Band 2: Szenarien I bis IV*, download unter: <http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00538/>.

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

PROGRAMM ELEKTRIZITÄSTECHNOLOGIEN UND -ANWENDUNGEN

Roland Brüniger

roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch



(Quelle: awtec)

Energiesparender Wäschetrockner

Funktionsmuster eines Vakuumentrockners mit offener Frontwand und PC zur Messdatenerfassung. Die Konzeption und Entwicklung erfolgt unter Einbezug der Industrie und verspricht eine neuartige, effiziente Wäschetrocknung.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Mehrere einschlägige Pressemitteilungen sowie diverse parlamentarische Vorstösse haben dem Thema *Effizienter Stromverbrauch* im Jahr 2007 zu einer erhöhten Popularität verholfen. Hauptsächlich dem Standby-Verbrauch wurde eine grosse mediale und politische Aufmerksamkeit zuteil. Dies ist auch nicht verwunderlich, zeigen doch Analysen, dass in der Schweiz jährlich etwa 1'900 GWh Strom im Standby «verschwendet» werden, was über 3% des schweizerischen Stromverbrauchs entspricht. An diesem Punkt setzt das Forschungsprogramm **Elektrizitätstechnologie und -anwendungen** an mit dem Ziel, Grundlagen für einen sorgfältigen und effizienten Umgang mit der Elektrizität zu schaffen und die entsprechende Umsetzung vorzubereiten. Das Programm gliedert sich in die beiden Hauptbereiche **Technologien** und **Effiziente Anwendungen**.

Im Bereich **Technologien** bestand die Zielsetzung im Jahr 2007 darin, Fortschritte in den *thermoelektrischen Materialwissenschaften* durch eine Erhöhung der *Figure of Merit* zu erzielen und die Entwicklungen sowohl im Hoch-, als auch im Niedertemperaturbereich auf deren Anwendbarkeit zur direkten Energiekonversion Wärme-Elektrizität zu prüfen. Ergänzend sollte die Konstruktion eines thermoelektrischen Demonstrators initiiert werden, um die thermischen Modellrechnungen verifizieren zu können. Nach der erfolgreichen Lancierung mehrerer Projekte zur Abklärung energetischer Nutzungsmöglichkeiten des *magnetokalorischen Effektes* gilt es, konkrete, erfolgversprechende Anwendungen unter Einbezug der Industrie anzugehen. Im Bereich der *Hochtemperatursupraleitung* gibt es zwar immer wieder Fortschritte im Materialbereich; die Schweizer Industrie hält sich aber primär aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen mit eigenen Aktivitäten noch zurück. Umso wichtiger ist die Sicherstellung einer minimalen Kontinuität im Projekt- und Informationsbereich. Dies umfasst einerseits die Teilnahme am entsprechenden IEA-Programm und

andererseits eine kontinuierliche Interaktion mit der Industrie. Ferner galt es 2007, einen kompetenten und finanzstarken Industriepartner zu finden, um die *Druckluftspeichertechnologie* weiter zu entwickeln.

Der Bereich **Effiziente Anwendungen** weist mehrere Teilbereiche auf. Die *Informations- und Kommunikationstechnik* ist durch einen globalen Massenmarkt geprägt und trägt eine grosse Dynamik in sich. Eine Zielsetzung bestand darin, einerseits die in spezifischen Projekten gewonnenen Erkenntnisse konzentriert über die Landesgrenzen hinweg bekannt zu machen und andererseits internationale Aktivitäten auf die Schweiz zu übertragen. Ebenfalls sollten Projekte für einen effizienten Einsatz im Bereich *Home Automation* initiiert werden. Eine weitere Zielsetzung lag darin, das *Standby-Thema* generell aufzuarbeiten und Grundlagen für eine substantielle Verminderung dieser «Verluste» zu schaffen. Unverändert bestand ein Hauptfokus im Bereich *elektrische Antriebe* im Aufarbeiten von fachtechnischen Grundlagen für den geplanten Wissenstransfer durch *EnergieSchweiz*. Daneben galt es, technische Grundlagen zur Effizienzsteigerung von Motoren und Antriebssystemen zu entwickeln, wobei eine spezifische Zielsetzung in der Effizienzverbesserung des Traktionsbereichs der SBB lag. Im *Gerätebereich* bestand die Zielsetzung für 2007 darin, bei ausgewählten Geräten die Grundlagen für eine Effizienzsteigerung zu erarbeiten. Wäschetrockner, Minikühlschrank und USV-Anlagen standen dabei im Vordergrund.

Schliesslich sollte das nächste 4-Jahresprogramm des vorliegenden Forschungsprogramms auf der Basis des CORE-Konzepts konkretisiert und in einem Konzept festgelegt werden. Umsetzungsmässig galt es auch 2007, über nationale Medien die Aktivitäten und Ergebnisse des Programms bekannt zu machen und mit umsetzungsorientierten Aktivitäten zur Sensibilisierung beizutragen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

TECHNOLOGIEN

Hochtemperatur-Supraleitung (HTSL)

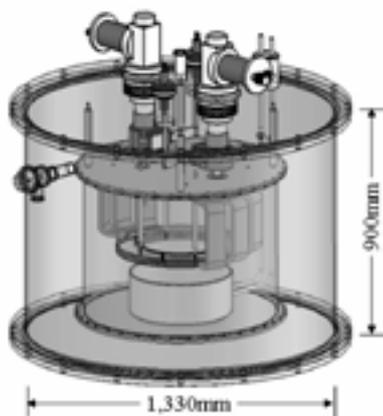
Neben der Schweiz nehmen am *IEA-Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector* [1] elf weitere Länder teil, womit ein umfassender Zugang zu Informationen über die weltweiten Aktivitäten auf dem Gebiet der HTSL gewährleistet wird. Im Vordergrund stehen einerseits die Entwicklungen von Supraleitermaterialien und andererseits industrielle Anwendungen wie Kabel, Strombegrenzer, Motoren, Genera-

toren, u.a.. Die USA hat verschiedene HTSL-Projekte im Kabelbereich am Laufen (siehe Fig. 1) und Südkorea ist ebenfalls im HTSL-Bereich sehr aktiv am Bauen verschiedener Anwendungen wie z.B. einem supermagnetischen Energiespeicher (SMES, siehe Fig. 2). 2007 konnten erstmals Y-123 Coated Conductor-Bänder mit Längen von 700 m und einer Stromdichte von 200 A/cm² hergestellt werden. Zudem hat Magnesiumdiborid (MgB₂) aufgrund der tiefen Kosten an Bedeutung gewonnen. Thematisch wurde 2007 speziell das Thema der Wechselstromverluste behandelt. Die umfangreichen Informationen dieser internatio-

nalen Arbeiten wurden an alle in der Schweiz in der Supraleitung tätigen Forschungsinstitute und Industrien im Rahmen des alljährlichen HTSL-Seminars vermittelt.



Figur 1: HTSL-Kabel des Columbus HTSL-Kabel-Projekts mit 13,2 kV und 69 MVA (American Superconductors, Praxair).



Figur 2: Kryostat des 600 kJ HTSL-SMES (Korea Electrotechnical Research Institute).

Energiekonversion

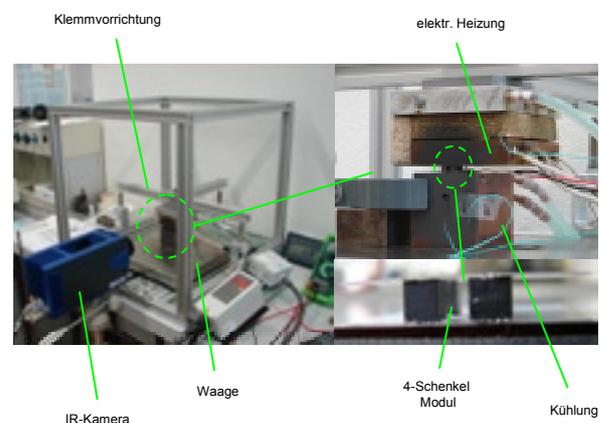
Die magnetokalorische Kühlung könnte in Zukunft die konventionelle Kältetechnik – mit oftmals problematischen Kältemitteln – in mehreren Nischenmärkten oder sogar in einigen Hauptmärkten des Kühlbereiches verdrängen. Im Projekt **Anwendung der magnetischen Kältetechnik und ihre Bewertung** [2a] wurde eine Rechenmethode entwickelt, um die «Coefficient of Performance (COP)»-Werte und die Exergie-Wirkungsgrade als Funktionen der magnetischen Feldstärke und der Rotationsfrequenz von rotierenden magnetischen Kältemaschinen zu ermitteln. Basierend auf dieser Arbeit konnten das *Haushalt-Kühlgerät ohne Gefrierfach* und die *zentrale Kälteeinheit* als erfolgversprechende Anwendungen identifiziert werden.

Das Hauptziel des Projekts **Anwendungen der magnetischen «Power Production» und ihre Bewertung** [2b] liegt im Identifizieren von verschiedenen Anwendungen der Abwärmenutzung, in denen die magnetische «Power Production» eine Alternative zu konventionellen Methoden der Energie-Konversion darstellen könnte. Erste Resultate zeigen, dass Systeme, welche auf Perma-

nent-Magneten basieren, auf ungefähr 140-160 °C Wärme-Quellen-Temperatur beschränkt sind. Mit supraleitenden Magneten ergibt sich hingegen ein viel weiterer Einsatzbereich mit einer oberen Limite von ungefähr 600 °C Quellen-Temperatur. Zudem hat sich gezeigt, dass die magnetische Energie-Umwandlung konventionellen Technologien in vielen Aspekten überlegen ist. Dies ist vor allem der Fall bei Niedrig-Exergie-Wärmequellen, wo konventionelle Energie-Konversions-Technologien nicht ausreichend funktionieren. Im Gegensatz dazu führt die magnetische «Power-Generation-Technologie» für diese Wärmequellen zu einer hohen Exergie-Effizienz.

Der thermoelektrische Effekt ermöglicht die direkte Umwandlung von Wärme in Elektrizität. Die EMPA nimmt mit den beiden Forschungsprojekten **Geo-Thermopower (Geo-TEP) Material** [3a] im Niedertemperaturbereich und **Materialentwicklung für solarthermische Stromerzeugung (Solar-TEP)** [3b] im Hochtemperaturbereich weltweit eine führende Position in der thermoelektrischen Materialforschung ein. Im Geo-TEP-Projekt stand das Untersuchen von orthorhomboiden, perovskitischen Kristallen im Vordergrund und im Solar-TEP-Projekt wurden die kristallinen Strukturen von Oxiden analysiert. In beiden Projekten wurden wesentliche Fortschritte erzielt.

Mit dem **Erstellen und Modellieren eines thermoelektrischen oxidischen Moduls (TOM) als Demonstrator** [3c] wird ergänzend zu den beiden vorerwähnten Projekten eine Brücke zu anwendungsorientierten Projekten an der ETH Zürich geschlagen (siehe Fig. 3). Denn mit dem Demonstrator soll neben anderem die Modellierung eines thermoelektrischen Elements geprüft werden, welches im Projekt **Thermoelektrisches Kraftwerk** [4a] entwickelt wurde. Die ersten Messungen zeigen eine gute Übereinstimmung, was die Ausarbeitung von Optimierungsstrategien für zukünftige Modularchitekturen mittels Simulationen erlaubt.



Figur 3: Überblick des Messaufbaus zur Nachprüfung der Simulation mit einem Demonstrator (EMPA, ETHZ).

Im Projekt **Anwendungspotential der thermoelektrischen Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich** [4b] wurden verschiedene Szenarien für den Einsatz von thermoelektrischen Generatoren bezüglich ihrer Leistungscharakteristika evaluiert und mit konventionellen Energiekonversionsverfahren verglichen. Allgemein kann der Schluss gezogen werden, dass die thermoelektrische Stromerzeugung eine Alternative ist, wenn die Kosten für die thermische Energie gering sind. Um mit konventionellen Systemen zu konkurrieren, ist eine starke Verbesserung der Materialien unumgänglich. Die Fortschritte im Materialbereich deuten darauf hin, dass mittelfristig konkurrenzfähige Materialien verfügbar sein dürften.

Speicherung

Das Projekt **Druckluftspeicherung: Optimierung / Auslegung bestehender Projektmuster** [5] stellt eine Ergänzung zum abgeschlossenen Projekt **Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B, Wärmetauscher und Motor/Generator-Einheit** dar. Dabei haben erste Versuche mit dem Wärmetauscher gezeigt, dass die gewählte Bauform thermisch den Anforderungen genügt. Es hat sich aber auch gezeigt, dass es im Umfeld des Flüssigkolbens noch unerwartete Effekte gibt, welche eine Weiterentwicklung der Versuchsanordnung erfordern. Diese Effekte wurden näher untersucht und analysiert. Unabhängig von den vorliegenden Arbeiten ist eine ausländische Industrie im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Kompressors für die Wasserstoffbetankung zu den gleichen Schlüssen gekommen und hat erfreulicherweise die grundsätzliche Funktion des Wärmetauschers bestätigt. Eine Fortsetzung der Arbeiten erfolgt erst unter Einbezug eines starken Industriepartners. Diesbezügliche Bemühungen laufen, haben aber bis anhin noch zu keinem konkreten Ergebnis geführt.

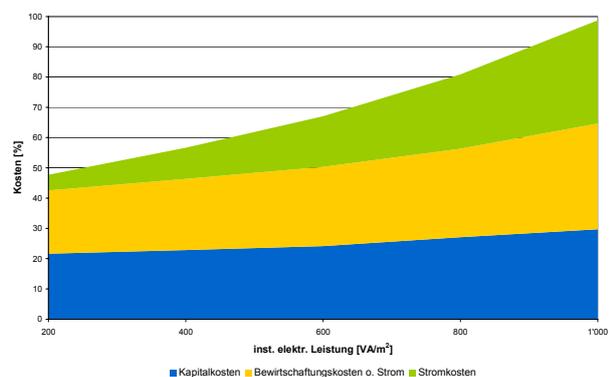
EFFIZIENTE ANWENDUNGEN

Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)

Das **Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik** [6] stellt eine nationale Informationsdrehscheibe bezüglich den internationalen Aktivitäten in Bezug auf die Energieeffizienz im Bereich der Informations-, Kommunikations- und Unterhaltungselektronik dar. Hier werden relevante Informationen gesammelt, aufbereitet und verbreitet. Daneben werden umsetzungsorientierte Forschungsthemen analysiert und Forschungsprojekte evaluiert, konzipiert und teilweise selbst durchgeführt. Im Jahr 2007 lag das Schwergewicht der Aktivitäten beim Stromverbrauch der Data Centres. Daneben erfolgte im Rahmen des primär durch die EU in Ausarbeitung stehenden **Code of Conduct for Data Centres** eine unterstützende Arbeit zur Thematik, wie die Energieeffizienz von Rechenzentren definiert und gemessen werden kann.

Im Projekt **Energieverbrauch der mobilen Kommunikation** [7] wird der Energieverbrauch der Infrastruktur für die Bereitstellung von Mobilfunkdiensten untersucht. Dazu wurden an diversen Mobilfunkstandorten und für verschiedene Technologien Langzeitleistungsmessungen an charakteristischen Netzelementen durchgeführt. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass zwischen der Netzauslastung und dem Leistungsbedarf eine mässige Korrelation besteht, dass die von der Netzauslastung abhängigen Schwankungen verglichen mit dem Grundleistungsbedarf verhältnismässig klein (< 5%) sind, und dass technologieabhängige Unterschiede bestehen. Um Hypothesen über die zukünftige Entwicklung des Energiebedarfs formulieren zu können, wurden ergänzend Mobilfunktechnologien wie UMTS 900, Femtozellen, Open Wireless und NGN/IMS eruiert, die in der näheren Zukunft die Bereitstellung von Mobilfunkdiensten beeinflussen könnten. Aus den Erkenntnissen werden anschliessend Optimierungsmöglichkeiten identifiziert und Handlungsalternativen formuliert.

IT-Server weisen immer höhere Integrationsdichten auf, was zu hohen Strombelastungen pro Fläche des Rechenzentrums führt. Die Benutzer der IT-Dienstleistungen (IT-Abteilungen) sind sich den steigenden Stromverbräuchen und Stromkosten oft nicht bewusst. Im Projekt **Stromeffiziente Rechenzentren durch Sensibilisierung über eine transparente Kostenrechnung** [8a] wird ein Kostenmodell entwickelt, das transparent darstellt, welche Rolle der Stromverbrauch und die Energieeffizienz beim Betrieb eines Rechenzentrums spielen. Das Modell zeigt auch auf, wie die Entwicklung in Zukunft aussieht, wenn von steigenden Integrationsdichten und höheren spezifischen Strombezügen von Rechenzentren ausgegangen wird. Nach der Erstellung eines ersten Modells wurde eine Sensitivitätsanalyse bezüglich Variation der installierten elektrischen Leistung und der Verfügbarkeitsklasse der Infrastruktur durchgeführt (siehe Fig. 4). Das Modell wurde anhand verfügbarer Daten von zwei bestehenden Rechenzentren plausibilisiert.



Figur 4: Kostenverlauf in Abhängigkeit der installierten, elektrischen Leistung pro m² (Encontrol GmbH).

Durch die guten internationalen Kontakte und dank der bisher in der Schweiz geleisteten Forschungsanstrengungen kann sich die Schweiz als assoziiertes Mitglied am Projekt **Development of the Market for energy efficient Servers** [8b] des EU-Programms Intelligent Energy Europe (IEE) beteiligen. Das Projekt zielt darauf ab, die beträchtlichen Potenziale für Energieeinsparungen und Kostensenkungen bei Servern in der Praxis zu demonstrieren und die Marktentwicklung für energieeffiziente Server zu unterstützen. Die Projektpartner erarbeiteten in der ersten Phase eine Studie über den Energieverbrauch von Servern in Europa mit einer Potenzialabschätzung über Einsparungen. Diese kommt zum Schluss, dass die Server und die dazu benötigte Infrastruktur für etwa 1.5% des Gesamtstromverbrauchs in Europa verantwortlich sind. Dies ist gleichbedeutend mit einem Stromverbrauch von etwa 40 TWh in der EU-27. Der Stromverbrauch für Server wird sich zwischen 2006 und 2011 etwa verdoppeln, wenn nicht Massnahmen zu einer verbesserten Energieeffizienz eingeführt werden können. Die Energieeffizienz in Rechenzentren könnte um etwa 25% verbessert werden und mit einer verstärkten Nutzung von Virtualisierung und Power Management kommen mittelfristig sogar Einsparungen von 50-60% in Reichweite.

Der Home Automation wird eine blühende Zukunft vorausgesagt und bereits rüsten verschiedene Heimbewohner ihr Haus entsprechend aus. Um den dadurch verursachten Strommehrverbrauch zu mindern, wird das Thema der effizienten Home Automation in den kommenden Jahren intensiv bearbeitet. Mit dem Projekt **Neuste Entwicklung im Bereich Home Automation und des damit verbundenen Stromverbrauchs** [8c] wird die technische Entwicklung im Bereich des intelligenten Wohnens untersucht und dokumentiert. Speziell der Eigenverbrauch der Aktoren und Beleuchtungsdimmer ist von Interesse, aber auch das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten des Automationssystems hat eine starke Auswirkung auf die Energieeffizienz einer solchen Anlage. Seit Projektbeginn wurden zwei Wohnobjekte mit einem gehobenen Ausbaustandard identifiziert und der Umfang für die Messung einzelner Komponenten umrissen.

Motoren / Elektrische Antriebe

Der Gesamtverbrauch der motorischen Antriebe und Antriebssysteme wird in der Schweiz auf etwa 45% des gesamtschweizerischen Stromverbrauchs geschätzt, was in absoluten Zahlen etwa 26'000 GWh/Jahr entspricht. Das durchschnittliche Einsparpotential liegt in der Grössenordnung von über 20%, was etwa 5'000 GWh/Jahr bedeutet. Aufgrund dieses grossen Potentials unternimmt das Programm grosse Anstrengungen, um dieses auch zugänglich zu machen.

Arbeitet ein Kolben mit einer el. Maschine zusammen, liegt es nahe, die el. Maschine linear auszuführen, um die Nachteile eines Kurbelantriebs zu umgehen. Im Projekt **Effizienter Lineargenerator / Linearmotor für Kolbenmaschinen** [9a] wurde diese Idee aufgegriffen. 2007 bestanden die Arbeiten in der Berechnung und Herstellung eines 1.5 kW Lineargenerators, dem Einbau in eine Stirlinganlage und der Inbetriebnahme der Anlage. Hauptanforderungen waren dabei eine kompakte, einfache Bauweise sowie ein hoher Wirkungsgrad für die Umwandlung mechanischer in elektrische Energie. Bei der ersten Inbetriebnahme des Lineargenerators wurde die Wicklung leider zerstört. Der neu gewickelte Stator musste deshalb mit Epoxy Harz (siehe Fig. 5) vergossen werden, um eine Unempfindlichkeit gegen Erschütterungen zu erreichen. Nach der erneuten Inbetriebnahme (siehe Fig. 6) erreichte der Generator in der Stirlinganlage eine elektrische Leistungsabgabe von 1000 W bei 50 Hz. 2008 wird der Wirkungsgrad ausgemessen.



Figur 5: Stator des Lineargenerators in Epoxyd vergossen (Circle Motor AG).



Figur 6: Lineargenerator auf dem Prüfstand (Circle Motor AG).

Im Projekt **Effizienter IEC Permanent-Magnet-Motor (3 kW)** [9b] wird ein Permanent-Magnet-Motor mechanisch für den Einbau in ein IEC-Normgehäuse mit möglichst hoher Effizienz konstruiert. Ebenfalls soll ein Konzept einer zugehörigen effizienten Steuerung entwickelt und die Steuerung anschliessend gebaut werden. 2007 sind mit der Berechnung und dem Bau des Permanent-Magnet-Motors, mit der Herstellung der Antriebssteuerung und mit der Inbetriebnahme auf dem Prüfstand bei der Hochschule Wallis die gesteckten Ziele erreicht worden.

Frühere Arbeiten haben aufgezeigt, dass Personenlifte – und dabei speziell Personenlifte im Wohnbereich – einen Standby-Anteil von teilweise über 70% des Gesamtstromverbrauchs aufweisen. Mit dem Projekt **Verbesserung der Energieeffizienz von Aufzügen und Förderanlagen durch Entwicklung eines neuartigen Frequenzumrichters** [10] soll der Standby-Verbrauch durch einen neuartigen Stromumrichter substantiell reduziert werden. Es wurden zwei Prototypen gebaut, welche für die anstehenden Tests verwendet werden können.

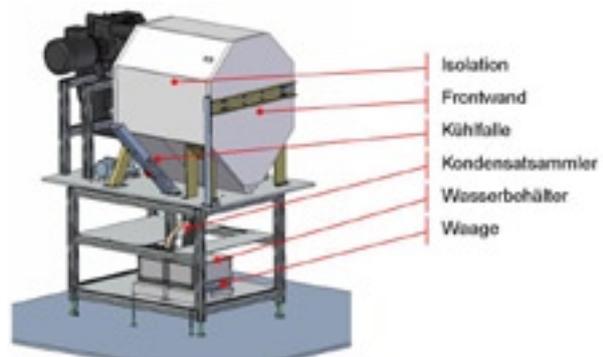
Eine an der Fachhochschule Zentralschweiz durchgeführte Ökobilanz anhand eines 7,5 kW Norm-Motors zeigt auf, dass der Einsatz eines effizienten EFF1-Motors [EFF1 = europäische Motoren-Effizienzklasse] im Vergleich zu einem weniger effizienten EFF2-Motor bereits nach einer Betriebszeit von weniger als 300 Stunden ökologischer ist. Das bedeutet, dass nach weniger als 300 Betriebsstunden der totale Treibhausausstoss des EFF2-Motors höher ist als derjenige des EFF1-Motors. Da sich effiziente Motoren nicht nur ökologisch, sondern auch wirtschaftlich auszahlen, wurde im Projekt **Erweiterung der LCC-Applikation mit Permanentmagnet-Motoren** [11a] das Werkzeug zur Berechnung der LCC (Life Cycle Costs = Vollkostenbetrachtung) bei der Beschaffung von Motoren um die Permanentmagnet-Motoren erweitert.

In die gleiche Richtung zielt auch das Projekt **OPAL: Erweiterung für Permanentmagnet-Motoren** [12]. Das bestehende Auslege-Tool OPAL wird dabei mit einem Modul für Permanentmagnet-Motoren ergänzt, welches es ermöglicht, Einsparungsvergleiche mit diesen Motorentypen durchzuführen. Zudem wird zur Erhöhung der Benutzerfreundlichkeit eine Browser-Oberfläche implementiert.

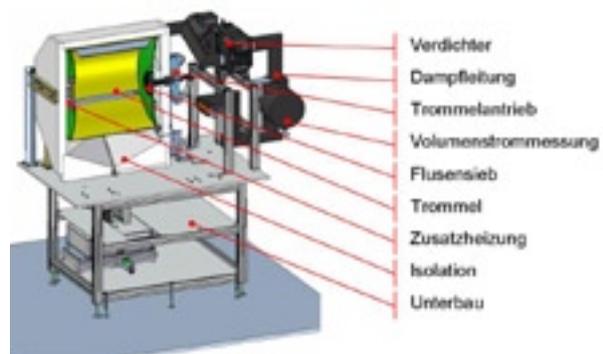
Beide vorerwähnten Software-Tools stehen allen Interessierten kostenlos zur Verfügung und werden bei den anstehenden Aktionen für einen effizienten Einsatz von elektrischen Motoren im Rahmen von *EnergieSchweiz* genutzt.

Geräte

Nachdem eine vorgelagerte Machbarkeitsprüfung zu positiven Ergebnissen gelangte und der involvierte Industriepartner ebenfalls für Arbeiten motiviert werden konnte, wurde im Projekt **Funktionsmuster eines energiesparenden Wäschetrockners** [13] ein Funktionsmuster eines Vakuumentrockners aufgebaut und ausgiebig ausgemessen (siehe Figuren 7 und 8). Die Ergebnisse zeigen ein wäscheschonendes Verhalten bei hoher Effizienz. Die angestrebte Trocknungsleistung von 3 kg/Std. wurde noch nicht erreicht und weitere Verbesserungen und Messungen sind erforderlich.



Figur 7: Rückansicht des Wäschetrockner-Funktionsmusters (awtec).



Figur 8: Schnittansicht des Wäschetrockners mit Hauptbaugruppen (awtec).

Die heute in Schweizer Hotelzimmern installierten Minikühlschränke verbrauchen im Durchschnitt etwa 1,2 kWh/24 h pro Gerät und insgesamt etwa 24 GWh Strom pro Jahr. Würden alle diese Geräte durch ein erhältliches effizientes Absorbergerät (0.7 kWh/24 h) ersetzt, wäre eine Energieeinsparung von über 10 GWh pro Jahr möglich. Im Projekt **Energieoptimierter Minikühlschrank** [14a] wurde zudem festgestellt, dass die Effizienz des Absorberkühlschranks basierend auf dem Know-how eines Industriepartners stark verbessert werden könnte. Geräte mit einem Stromverbrauch in der Grössenordnung von 0.45 bis 0.5 kWh/24 h bei 40 Liter Nutzinhalt sind dann möglich.

Die Optimierung der Kühltechnologie allein genügt nicht, dass effizientere Geräte gekauft und betrieben werden. Weil für die Deklaration des Energieverbrauchs von Minibars keine verbindliche Norm existiert, sind die angegebenen Energieverbrauchswerte der Hersteller mit Vorsicht zu betrachten. Eine Verpflichtung, die Effizienz der Geräte von einem unabhängigen Prüfinstitut nach ISO 15002 (früher ISO 7371) messen und kennzeichnen zu lassen, würde es dem Käufer ermöglichen, die Energiewerte verschiedener Produkte einfach zu vergleichen. Deshalb wird im Projekt **Ausschreibungsformular Minibar** [14b] zusammen mit interessierten Herstellern ein Ausschreibungsformular entwickelt, das zu jedem Kühlschrank wichtige Informationen zum Energieverbrauch umfasst.

In letzter Zeit wird durch die Medien und die Politik dem Thema Standby-Verbrauch vermehrt Beachtung geschenkt. Im Projekt **Verminderung der Standby-Verluste** [15] wurden Hindernisse und Massnahmen zur Überwindung des Standby-Verbrauchs erarbeitet. Dabei konnte auch die wirtschaftliche Bedeutung quantifiziert werden, verursachen doch rund 1'900 GWh Standby-Verluste Stromkosten in der Grössenordnung von jährlich 320 Mio. Franken. Davon entfallen drei Viertel auf Geräte im Haushalt, mit der Unterhaltungselektronik als gewichtigste Kategorie (siehe Fig. 9). Obwohl Fortschritte seitens der Geräteanbieter zu beobachten sind und voraussichtlich auf der Basis der *europäischen EuP-Direktive* (EuP: Energy using Products) regulatorische Mindestanforderungen weitere Verbesserungen erzielen werden, sind Aktivitäten auf der Anwenderseite kurz- und mittelfristig unerlässlich. Neben anderem werden diverse, am meisten Erfolg versprechende Um-

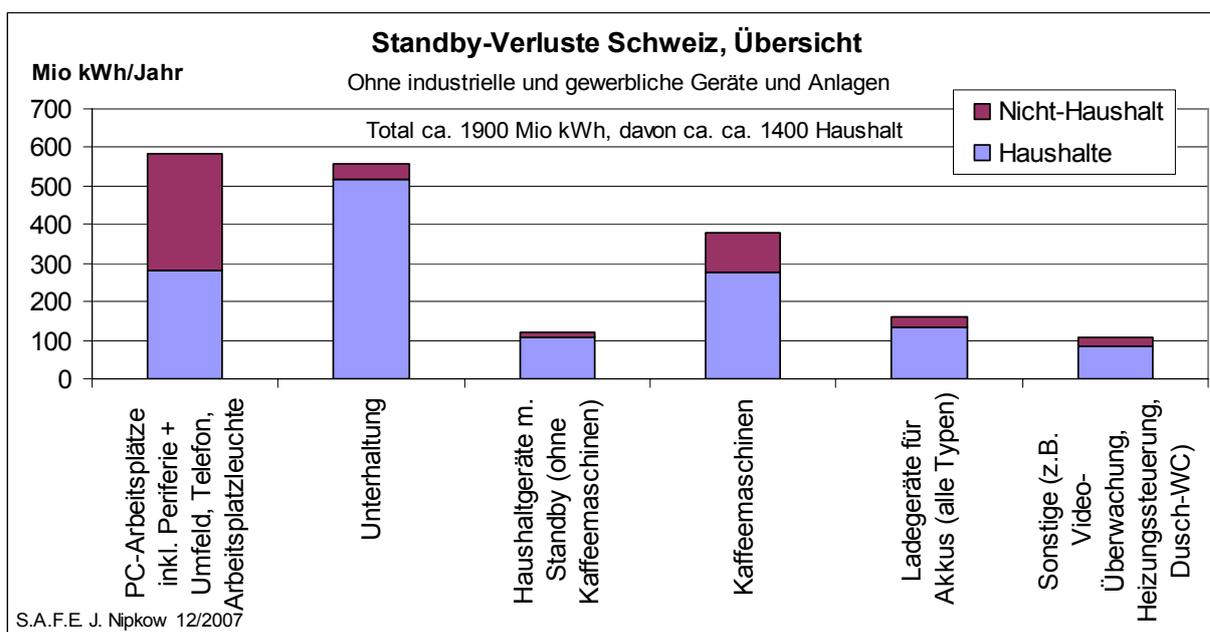
setzungsmassnahmen und -Projekte zur Standby-Vermeidung vorgeschlagen.

Ebenfalls dem Thema Standby ist das Projekt **Konzept für Redesign Ecoman** [16] gewidmet. Der im schweizerischen Markt als externes Gerät für die Vermeidung von Standby-Verlusten eingeführte Ecoman wurde analysiert und es wurden diverse Optimierungs- und Funktionalitätserweiterungen identifiziert. Damit soll ein «idealer» Ecoman definiert werden und diese Konzeptarbeit soll Grundlage für eine Weiterentwicklung des bestehenden Produkts sein.

Der **Betrieb ohne Nutzung (BoN)** [17] beschreibt elektrische Verbraucher, die bei Teil- oder Volllast laufen, aber zeitlich und örtlich keine nutzbare Leistung erbringen. Die im gleichnamigen Projekt vorgesehene Untersuchung will in zwei Schritten den elektrischen Verbrauch des BoN vorerst für den Dienstleistungssektor Top-down und anhand von Musterbauten Bottom-up abschätzen. In einer späteren Phase sollen Vorschläge für die Verminderung dieses unnötigen elektrischen Verbrauchs dargelegt werden.

Licht / Leuchten

T5-Lampenadapter werden durch verschiedene Anbieter als Möglichkeit zum Stromeinsparen angepriesen, obwohl es dazu verschiedene Studien mit teilweise widersprüchlichen Resultaten gibt. Ziel des Projekts **Qualität und Wirtschaftlichkeit von T5-Lampenadaptern** [18] ist es, unter Berücksichtigung von lichttechnischen Aspekten eine Aussage aus neutraler Sicht bezüglich der Qualität und Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von T5-Lampenadaptern zu machen. In der Studie wurden 8 Prüflinge ausgemessen. Die Ergebnisse



Figur 9: Hochrechnung der Standby-Verluste in der Schweiz, Stand Dezember 2007 (ARENA)

zeigen auf, dass ein Einsatz nicht vorbehaltlos empfohlen werden kann und dieser sorgfältig und fallweise abgewogen werden muss.

Zur Zeit existieren wenig gesicherte Datengrundlagen über die effektive Nutzungszeit von Lampen in Haushalten. Dies ist einer der Gründe, warum diverse Statistiken zu unterschiedlichen Aussagen bezüglich dem Stromanteil der Beleuchtung kommen. Im Projekt **Verbrauchsabschätzung von Lampen in Privathaushalten** [8d] wurde mittels einer Vielzahl von Expertengesprächen, unter Beizug der Daten der im 2005 durchgeführten VSE-Erhebung (VSE: Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen), und insbesondere unter Einbezug von zwei grossen Messkampagnen in der EU, ein Verbrauchsmodell des Lichtverbrauchs für die schweizerischen Haushalte entwickelt.

Diverses

Die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) sind das Einzelunternehmen mit dem grössten Stromverbrauch in der Schweiz. Allein für die Traktion und Zugheizung werden rund 2'000 GWh/Jahr

an elektrischer Energie verbraucht. Selbst prozentuale kleine Verbrauchsreduktionen können deshalb einen nennenswerten Beitrag leisten. Zusammen mit Fachleuten der drei SBB-Divisionen Personenverkehr, Güterverkehr und Infrastruktur wurde im Projekt **Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB** [19] der Istzustand besprochen und Vorschläge zur Verbrauchssenkung diskutiert. Anhand umfangreicher und detaillierter Simulationsrechnungen für einzelne Zugfahrten verschiedenster Zugarten und Fahrzeugtypen über reale Streckendaten der SBB, konnte der Verbrauch hochgerechnet und mit den tatsächlichen Werten für das Gesamtnetz verglichen werden. Daraus kann das mögliche relative Einsparpotential beispielsweise durch energieoptimierte Fahrweise des Lokführers oder gezielte Zugsteuerung durch die Betriebsführung abgeschätzt werden. Es beträgt je zwischen 3% und 5% des spezifischen Verbrauchs. Das Potential technischer Massnahmen an Triebfahrzeugen und Reisezugwagen, wenige Promille bis 3% je Fahrzeugart, lässt sich ebenfalls aus den Modellrechnungen bestimmen und über den aktuellen Flotten- und Betriebsmix der SBB hochrechnen.

Nationale Zusammenarbeit

Durch die BFE-Programmleitung werden periodische Treffen im Rahmen der etablierten **BFE-Trendwatching-Gruppen** in den Themen *Informatik + Kommunikation (IKT)*, *elektrische Antriebe*, *Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)* und *Hochtemperatursupraleitung* organisiert. Damit stehen themenorientiert nationale Informations- und Diskussionsplattformen für Fachleute aus Industrie, Hochschule und Forschungsstätten zur Verfügung, welche sich bewährt haben und gegenseitig fruchtbare Inputs ermöglichen. Da in den kommenden Jahren ein Schwerpunkt im Bereich Home Automation vorgesehen ist, ist es erfreulich, dass als Erweiterung der IKT-Gruppe ein Mitglied von *GNI (Gebäude Netzwerk Institut)* gewonnen werden konnte.

Das Projekt *Materials with Novel Electronic Properties (MANEP)* des **Schweizerischen Nationalfonds** umfasst 19 nationale Institute sowie 5 Industrien und beschäftigt sich theoretisch oder experimentell mit HTSL-Supraleitern. Die nationale Zusammenarbeit wurde dank des MANEP-Projekts gestärkt. Weiter wurde die nationale Zusammenarbeit durch zwei **KTI-Projekte** gefördert.

Mit dem **BFE-Forschungsprogramm Energie in Gebäuden** ist eine enge Zusammenarbeit sichergestellt. Insbesondere im Bereich *Intelligentes Gebäude* erfolgt eine gute Kooperation.

Die Zusammenarbeit mit der **Industrie** konnte in verschiedenen Bereichen (z.B. SBB, Motorenin-

dustrie, Telecom-Unternehmungen, Detailhandel) weitergeführt werden. Es wird bei neuen Projekten soweit möglich darauf geachtet, dass ein Industriepartner im Projekt eingeschlossen ist. Damit wird angestrebt, dass bei einem Projekterfolg die anschliessende Umsetzung auch angegangen wird.

Generell wird ein enger Kontakt mit dem Programm **EnergieSchweiz** [25] gepflegt, was wesentlich zur nationalen Umsetzung des generierten Wissens beiträgt. Für die vorgesehenen Aktionen im Bereich der *effizienten Antriebe/Motoren* sind die erforderlichen technischen Grundlagen weitgehend aufgearbeitet worden und stehen für den Wissenstransfer durch EnergieSchweiz zur Verfügung.

Beide **Eidg. Technische Hochschulen** (Zürich, Lausanne) werden soweit zweckmässig in die Forschungsaktivitäten miteinbezogen und der Einbindung von **Fachhochschulen** wird ebenfalls grosse Bedeutung beigemessen. So haben die Fachhochschule Westschweiz (Sion), Nordwestschweiz (MuttENZ), 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 etablierte **Kompetenzzentrum Energie- und Informatik** an der ETH Zürich leistet weiterhin

einen wichtigen Beitrag zur nationalen (wie auch internationalen) Zusammenarbeit.

Durch die gemeinsame Finanzierung von Forschungsprojekten konnten bestehende Kontakte zu weiteren **Förderinstitutionen** wie dem *Energiesparfonds des EWZ*, dem *Stromsparfonds Baselstadt* und der *KTI* gepflegt werden. Zudem sind Kontakte mit *Swiss Electric Research* [26] der schweizerischen Stromverbundunternehmen hergestellt worden.

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 Zusammenarbeit ist im **Supraleitungs-Bereich** im Rahmen des **6. EU-Rahmenprogramms** etabliert (Projekt STRP-505724-1 HIPERMAG). In diesem Projekt werden bis anfangs 2008 MgB₂-Bänder und -Drähte mit dem Ziel erforscht, Anwendungen bei 20 Kelvin zu entwickeln. 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** durchführen kann, in dem elektrische Leiter aus den USA, Japan und Deutschland ausgemessen und charakterisiert werden.

Durch die aktive 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* 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 konzentriert sich schwergewichtig auf den Bereich der *elektrischen Antriebe/Motoren*.

Stark engagiert hat sich die Programmleitung auch im Rahmen des EU-Programms **Intelligent Energy Europe IEE**. So arbeitet die Schweiz seit Projektbeginn am Projekt **Development of the market for energy efficient Servers** [28] mit, bringt Fachwissen ein und kann am erarbei-

In mehreren Projekten wird ein enger Kontakt zu den schweizerischen **Energieagenturen EnAW, eae** und **S.A.F.E** [27] gepflegt. In diversen Projekten sind – soweit zweckmässig – **Branchenverbände** wie z.B. *swissT.net*, *SWISSMEM*, *SWICO* eingebunden. So wurden die Arbeiten *am Code of Conduct im Settop-Boxenbereich* in enger Zusammenarbeit mit dem Branchenverband *SWICO* und der *Energie Agentur Elektrogeräte (eae)* durchgeführt.

teten Wissen partizipieren. 2007 konnte sich die Schweiz ferner gleich in drei Projektanträgen als assoziiertes Team-Mitglied einbringen, nämlich im Projekt *Energy Efficient Cooling System (Coolsys)*, *Development and market introduction of a voluntary EU-Label for energy-efficient refrigerators and freezers for the commercial use (ComCool-Label)* und *Standby Energy Losses in new Appliances measured in Shops (SELINA)*.

Die EU hat in der schnelllebigen Welt der Kommunikations- und Informationstechnologie vorerst den Weg der freiwilligen Vereinbarung gewählt und im Rahmen der europäischen Standby-Initiative sind sogenannte **Code of Conducts (CoC)** [29] in den Bereichen *Settop-Boxen*, *Broadband Devices* und *External Power Supply* entstanden. Sowohl bei der Entstehung als auch in der kontinuierlichen Verbesserung dieser CoC wird die Schweiz jeweils eingeladen und kann ihre entsprechenden Erfahrungen einbringen. Im USV-Bereich (Anlagen > 10 kVA) hat die Schweiz für die EU den CoC unter Einbezug der Industrie ausgearbeitet. 2007 wurde gemeinsam mit der EU daraufhin gearbeitet, dass dieser USV-CoC durch die Industrie unterzeichnet wird.

Persönliche Kontakte zu verschiedenen **Energieagenturen** (insb. Dänemark, Deutschland, Österreich, Frankreich) sowie zu Schlüsselpersonen von internationalen Programmen, wie z.B. das **UK Market Transformation Programme**, verhelfen immer wieder zu inspirierenden Anregungen. Ferner werden die Kontakte mit der **Europäischen Kommission**, der **IEA (International Energy Agency)**, der **EPA (Environmental Protection Agency)** und dem **LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)** weiter gepflegt. Durch die Arbeiten im europäischen **Motor Challenge Programme** werden gleichermassen internationale Beziehungen gefestigt.

Pilot- und Demonstrationsprojekte / Umsetzungsaktivitäten

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

Die EU hat auf freiwilliger Basis mit den *Code of Conducts (CoC)* ein Instrument geschaffen, mit dem sich engagierte Industrien verpflichten können, Geräte mit minimalen Verbrauchswerten zu produzieren oder zu beschaffen. Obwohl sich die Programmleitung speziell in den Bereichen *Set-top-Boxen* und *Broadband Devices* stark für tiefe Werte eingesetzt hat, ist der im Moment definierte Absenkungspfad relativ moderat. Um effizientere Werte zu erreichen, bringt sich die Programmleitung in die noch laufenden EU-Arbeiten *Energy using Products (EuP)* für komplexe Settop-Boxen ein. Dies ist für die Schweiz insofern wichtig, als dass die in diesen Arbeiten definierten Werte zumindest als Anhaltspunkt für allfällige regulatorische Massnahmen in der EU dienen dürften, und die Schweiz ja auf der Basis des revidierten Energiegesetzes gleichermassen gesetzliche Mindestanforderungen festlegen will. Obwohl diese tief sein sollten, ist dazu eine internationale Harmonisierung notwendig.

Motoren / elektrische Antriebe

Aufgrund des enormen Einsparpotentials im Bereich der elektrischen Antriebe/Motoren ist es von grosser Bedeutung, dass während der Ausbildung von Berufsleuten, Technikern und Ingenieuren das Bewusstsein für diese Thematik gefördert wird. Nachdem in einem abgeschlossenen Projekt der Fokus auf der Erstausbildung lag, werden im Projekt ***Certificate Advanced Studies: Effizienz und Energie*** [20] auf der Basis des Erstprojekts diese Grundlagen erweitert, sodass sie auch Berufstätigen im Rahmen von Weiterbildungsveranstaltungen der Hochschule Luzern angeboten werden können. Damit sollen Grundlagen für die Vermittlung von Erkenntnissen über die Energieeffizienz im motorischen Bereich erarbeitet werden.

Die Schweiz nimmt als assoziiertes Mitglied am europäischen ***Motor Challenge Programme (DEXA-MCP)*** [21] aktiv teil und stellt die nationale Verbreitung der erarbeiteten Ergebnisse sicher. Neben dem Pflegen der Web-Seite [30] und dem Publizieren mehrerer Fachartikel wurden auch zwei News-Letters versandt. Am schweizerischen Motor Summit 2007 konnte das Motor Challenge Programme durch den europäischen Projektleiter vorgestellt werden.

Die Schweiz ist aktiv am Aufbau des neuen IEA Projekts *4E (Efficient Electrical End-Use Equip-*

ment) engagiert. Insbesondere aufgrund diverser Vorarbeiten im vorliegenden Forschungsprogramm und des internationalen Harmonisierungsprojekts SEEEM (Standards for Energy Efficient Electric Motors Systems) hat sich die Schweiz international hervorgetan und wird die Führung des ***Motor Systems Annex von 4E*** [22] einnehmen. 2008 werden die Arbeiten gestartet. Damit kann die internationale Verflechtung in diesem wichtigen Bereich substantiell vertieft werden.

Es ist erfreulich, dass die Ergebnisse eines bereits seit längerem abgeschlossenen Schweizer Forschungsprojekts zum Thema Aufzüge durch die VDI-Gesellschaft (VDI: Verein deutscher Ingenieure e.V.) aufgegriffen wurde und eine VDI-Richtlinie mit dem Titel ***Aufzüge Energieeffizienz*** ausgearbeitet hat. Die Richtlinie liegt im Entwurf als VDI 4707 vor und ermöglicht erstmals, die Effizienz von Aufzügen nach Energieeffizienzklassen einzustufen.

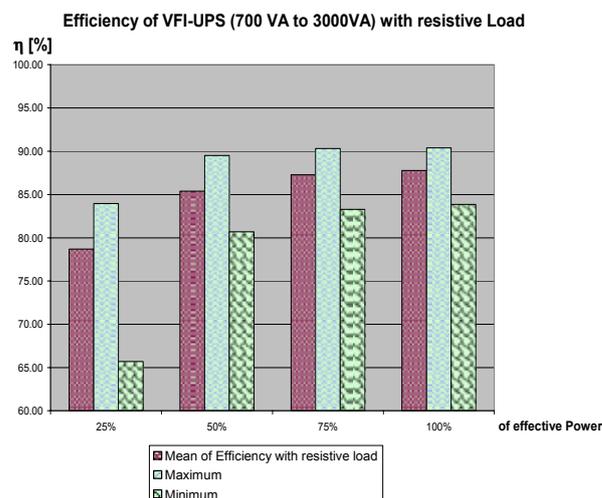
Schliesslich sei angemerkt, dass die Grundlagen für die Aktionen zur Umsetzung von Wissen im Bereich Antriebe weitgehend vorliegen und nun die Vorbereitungsarbeiten für diese Aktionen im Rahmen von *EnergieSchweiz* laufen.

Geräte

Seit einigen Jahren engagiert sich das Forschungsprogramm für eine Effizienzsteigerung von USV-Anlagen und nimmt mit diesen Arbeiten international eine Vorreiterrolle ein. Nachdem der ***Code of Conduct für USV-Anlagen*** [23] im Leistungsbereich über 10 kVA verfügbar war, wurde 2007 der bereinigte und unterzeichnungsbereite Code of Conduct für USV-Anlagen in der nationalen USV-Trendwatching-Gruppe erläutert und für die Unterzeichnung der Schweizer Unternehmen empfohlen. Zur Verbesserung der Möglichkeiten für die Bewertung von USV-Anlagen wurde ferner zusammen mit der USV-Trendwatching-Gruppe ein auf Excel basierendes Berechnungsprogramm zur Evaluation und zum Vergleich von mehreren USV-Anlagen ausgearbeitet. Der Vergleich der betrachteten USV-Anlagen beruht dabei auf der Berechnung der jeweiligen Lebenszykluskosten der einzelnen Anlagen. Schliesslich wurde eine Dokumentationsmappe zu USV-Anlagen für die Abgabe durch die Hersteller und Händler an der Industriemesse Ineltec im Herbst 2007 vorbereitet.

Für USV-Anlagen mit einer Leistung unter 10 kVA besteht die Idee, zusammen mit der EU ein Energielabel zu entwickeln. Als Voraussetzung dazu ist es notwendig, einen Überblick über die aktuellen Verbrauchswerte des Marktangebotes zu erhalten. Im Rahmen des Projektes ***Energiemessungen von 1-phasigen USV-Anlagen*** [24] wurden 46

1-phasige USV-Geräte im Leistungsbereich von 350VA bis 3000VA bezüglich Wirkungsgrad und Energieverbrauch ausgemessen. Wie erwartet, weisen die VFD-Geräte (Voltage and Frequency Dependent) den besten Wirkungsgrad auf, gefolgt von den VI-Geräten (Voltage Independent) und den VFI-Geräten (Voltage and Frequency Independent). Die Wirkungsgrade bei 50%, 75% und 100% der Nennbelastung unterscheiden sich nur wenig und liegen mehrheitlich über 90%. Dagegen fällt der Wirkungsgrad deutlich ab bei einer Belastung von 25% (zum Teil unter 80%, siehe Fig. 10).



Figur 10: Wirkungsgrad der VFI-USV-Anlagen mit ohmscher Last im Leistungsbereich 480 W – 2'400 W.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Das *Energieforschungsprogramm für die Periode 2008 – 2011* konnte im Detail ausgearbeitet werden und wurde durch die eidg. Forschungskommission verabschiedet. Damit ist in Anlehnung an das übergeordnete BFE-Energieforschungskonzept der Rahmen und die Stossrichtung des vorliegenden Forschungsprogramms für die kommenden vier Jahre festgelegt.

Im Bereich **Technologien** wurden bei der *thermoelektrischen Energiekonversion* Fortschritte in der Materialforschung gemacht. Leider dürfte das Fachwissen in den applikationsorientierten Projekten an der ETHZ nach dem Abschliessen der beiden laufenden Projekte teilweise verloren gehen, da beide involvierten Doktoranden die ETH verlassen werden. Gemeinsam ist 2008 eine Lösung zu suchen, damit das Wissen Dritten übergeben werden kann. Anfang 2008 werden die Ergebnisse der beiden Projekte zur *magnetokalorischen Energiekonversion* vorliegen. Erste Ergebnisse bestätigen, dass es interessante Anwendungen geben dürfte und 2008 sollen diese wenn möglich unter Einbezug der Industrie konkretisiert werden. Im *HTSL-Bereich* ist die Industrie immer noch zögerlich; es konnten 2007 keine konkreten Applikationsprojekte initiiert werden. Der Kontakt mit der Industrie wird aber gepflegt und für 2008 wird unverändert angestrebt, in diesem Bereich ein Projekt zur Effizienzsteigerung zu initiieren. Trotz verschiedenen Industriekontakten konnte bis anhin kein Industriepartner für die Fortführung der *Druckluftspeichertechnologie* gefunden werden. Die entsprechenden Anstrengungen werden 2008 fortgesetzt.

Bei den **effizienten Anwendungen** konnte im Bereich der *Settop-Boxen* sowohl anlässlich einer internationalen IEA-Konferenz als auch an den CoC-Sitzungen ambitionierte Zielwerte für den

Standby-Verbrauch eingebracht werden. Diese Bestrebungen werden unvermindert fortgesetzt, wobei einerseits die aktive Teilnahme am *Settop-Boxen-Projekt* des *4E-IEA-Programms* und andererseits die Kontakte zur Projektleitung *Komplexe Settop-Boxen* der europäischen *EuP-Direktive* unterstützend wirken werden. Ebenfalls als Teil der Anstrengungen im Bereich *IKT* ist positiv zu werten, dass die angepeilte Forcierung im Bereich *Home Automation* einerseits durch die Initiierung neuer Projekte und andererseits durch die Gewinnung eines kompetenten Teilnehmers in der *IKT-Trendwatching-Gruppe* positiv anlief. Das Thema *Standby* konnte zudem generell aufgearbeitet werden und neben der Quantifizierung der *Standby-Verluste* liegen nun auch umsetzungsorientierte Erkenntnisse mit entsprechenden Vorschlägen vor. Bei den *elektrischen Antrieben/Motoren* sind die Vorarbeiten für die Führung des *Motoren-Annexes* im *Implementing Agreement 4E* weit vorangetrieben worden. Auch ist die Erarbeitung von Grundlagen für die Umsetzung durch *EnergieSchweiz* abgeschlossen worden. Ferner liegen fundierte Vorschläge zur *Effizienzsteigerung im Bahnbetrieb* vor. Im *Gerätebereich* wurden neben den laufenden Projekten Industriekontakte aufgebaut, um gemeinsam weitere Geräte auf Effizienz zu trimmen. Es wird angestrebt, 2008 konkrete Projekte zu initiieren.

In diversen Publikationen der einschlägigen Fachpresse wurde über die Ergebnisse des Forschungsprogramms *Elektrizität* berichtet. Verschiedene Rückmeldungen haben ferner bestätigt, dass der kurze TV-Auftritt der Programmleitung 2007 im Rahmen eines Berichts über das neue Rechenzentrum der *Swisscom* positiv vermerkt wurde. Für 2008 wird den *umsetzungsorientierten Aktivitäten* unverändert starkes Gewicht beigemessen.

Aufgrund der Neuorganisation beim BFE erfolgt BFE-intern per 1.1.2008 ein Wechsel in der Programmbegeleitung. Ferner erfährt die Homepage

des Forschungsprogramms [31] eine visuelle Erneuerung und wird gleichzeitig durch das BFE geführt.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 vorhanden (siehe www.electricity-research.ch)

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch und www.electricity-research.ch)

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

- [1] R. Flükiger (rene.flukiger@physics.unige.ch), UNIVERSITÉ DE GENÈVE, Genève: **Implementing Agreement for a Co-operative Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector** (JB Projekt 101'533)
- [2] P. Egolf, A. Kitanovski, O. Sari (peter.egolf@heig-vd.ch), HEIG-VD, Yverdon: a) **Anwendung der magnetischen Kältetechnik und ihre Bewertung** (JB Projekt 101'776) • b) **Anwendungen der magnetischen «Power Production» und ihre Bewertung** (JB Projekt 101'776)
- [3] A. Weidenkaff (anke.weidenkaff@empa.ch), EMPA, Dübendorf: a) **Geo-Thermopower (Geo-TEP)- Material** (JB Projekt 101'356) • b) **Materialentwicklung für solarthermische Stromerzeugung** (JB Projekt 101'706) • c) **Erstellen und Modellierung eines thermoelektrischen oxidischen Moduls (TOM) als Demonstrator** (JB Projekt 101'356)
- [4] K. Fröhlich, A. Bitsch, C. Eisenhut (fröhlich@eeh.ee.ethz.ch), ETH Zürich: a) **Das thermoelektrische Kraftwerk** (JB Projekt 101'356) • b) **Anwendungspotential der thermoelektrischen Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich** (JB Projekt 101'706)
- [5] P. Brückmann, I. Cyphelly (brueckmannelektronik@bluewin.ch), BRÜCKMANN ELEKTRONIK, Davos, CYPHELLY & CIE, Les Brenets: **Druckluftspeicherung: Optimierung / Ausmessung bestehende Projektmuster** (SB Projekt 100'985)
- [6] B. Aebischer (baebischer@ethz.ch), CEPE, ETH, Zürich: **Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik** (JB Projekt 30'963) <http://www.biblioite.ethz.ch>
- [7] M. Hufschmid, A. Corliano (markus.hufschmid@fnw.ch), FACHHOCHSCHULE NORDWESTSCHWEIZ, Muttenz: **Energieverbrauch der mobilen Kommunikation** (JB Projekt 102'013)
- [8] A. Huser, T. Grieder (alois.huser@encontrol.ch), ENCONTROL GMBH, Niederrohrdorf. • a) **Stromeffiziente Rechenzentren durch Sensibilisierung über eine transparente Kostenrechnung** (JB Projekt 102'259) • b) **Development of the Market for energy efficient Servers** (Projekt 101'967) • c) **Neuste Entwicklung im Bereich Home Automation und des damit verbundenen Stromverbrauchs** (Projekt 102'344) • d) **Verbrauchsabschätzung von Lampen in Privathaushalten** (SB Projekt 101'778)
- [9] J. Lindegger (info@circlemotor.ch), CIRCLE MOTOR AG, Gümligen: a) **Effizienter Lineargenerator/Linearmotor für Kolbenmaschinen** (JB Projekt 100'915) • b) **Effizienter Permanent-Magnet-Motor im Bereich 3kW** (JB Projekt 101374)
- [10] P. Kanyio, M. Bolla (mario.bolla@telma.ch), ECONODRIVES GMBH, Seftigen: **Verbesserung der Energieeffizienz von Aufzügen und Förderanlagen durch Entwicklung eines neuartigen Frequenzumrichters** (JB Projekt 101'691)
- [11] G. Schnyder (gilbert.schnyder@sing.ch), SCHNYDER INGENIEURE AG, Hünenberg: a) **Erweiterung der LCC-Applikation mit Permanentmagnet-Motoren** (SB Projekt 100'683)
- [12] R. Tanner (tanner@semafor.ch), SEMAFOR INFORMATIK & ENERGIE AG, Basel: **OPAL-Erweiterung für Permanentmagnet-Motoren** (JB Projekt 102'128)
- [13] U. Weilenmann, M. Friedl (urs.weilenmann@awtec.ch), AWTEC AG FÜR TECHNOLOGIE UND INNOVATION, Zürich: **Funktionsmuster eines energiesparenden Wäschetrockners** (SB Projekt 101'681)
- [14] A. Burri (adrian.burri@awtec.ch), AWTEC AG FÜR TECHNOLOGIE UND INNOVATION, Zürich: a) **Energieoptimierter Minikühlschrank** (SB Projekt 101'953) • b) **Ausschreibungsformular Minibar** (JB Projekt 101'953)
- [15] J. Nipkow (juerg.nipkow@arena-energie.ch), ARENA, ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIE-ALTERNATIVEN, Zürich: **Vermeidung der Standby-Verluste** (SB Projekt 101'689)
- [16] V. Härrli (vinzenz.haerri@hslu.ch), HOCHSCHULE LUZERN, Horw: **Konzept für Redesign Ecoman** (SB Projekt 102'175)
- [17] Conrad U. Brunner (cub@cub.ch), S.A.F.E., Zürich: **Betrieb ohne Nutzung BoN** (JB Projekt 102'345)
- [18] P. Blattner (peter.blattner@metas.ch), BUNDESAMT FÜR METROLOGIE METAS, Bern-Wabern: **Qualität und Wirtschaftlichkeit von T5-Lampenadaptern** (SB Projekt 101'919)
- [19] M. Meyer, S. Menth (markus.meyer@emkamatik.com), EMKAMATIK GMBH, Wettingen: **Potentialermittlung energieeffiziente Traktion bei den SBB** (JB Projekt 101'826)

Liste Umsetzungsprojekte / P+D-Projekte

- [20] V. Härrli (vinzenz.haerri@hslu.ch), HOCHSCHULE LUZERN, *Horw: Certificate of Advanced Studies: Effizienz und Energie* (JB Projekt 101'796)
- [21] J. Nipkow (juerg.nipkow@arena-energie.ch), ARENA, ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIE-ALTERNATIVEN, Zürich: *Promotion und Koordination des EU Motor Challenge Programme* (JB Programme 100'403) www.motorchallenge.ch
- [22] C. U. Brunner (cub@cub.ch), A+B INTERNATIONAL, Zürich: *Motor Systems Annex for 4E* (JB Projekt 102'221)
- [23] G. Schnyder (gilbert.schnyder@sing.ch), SCHNYDER INGENIEURE AG, Hünenberg; *Weiterentwicklung des Code of Conduct für USV-Anlagen mit europäischen Gremien* (JB Projekt 101'109)
- [24] E. Bush (eric.bush@bush-energie.ch), BUSH ENERGIE, Felsberg: *Energiemessungen von 1-phasigen USV-Anlagen* (SB Projekt 101'928)

Referenzen

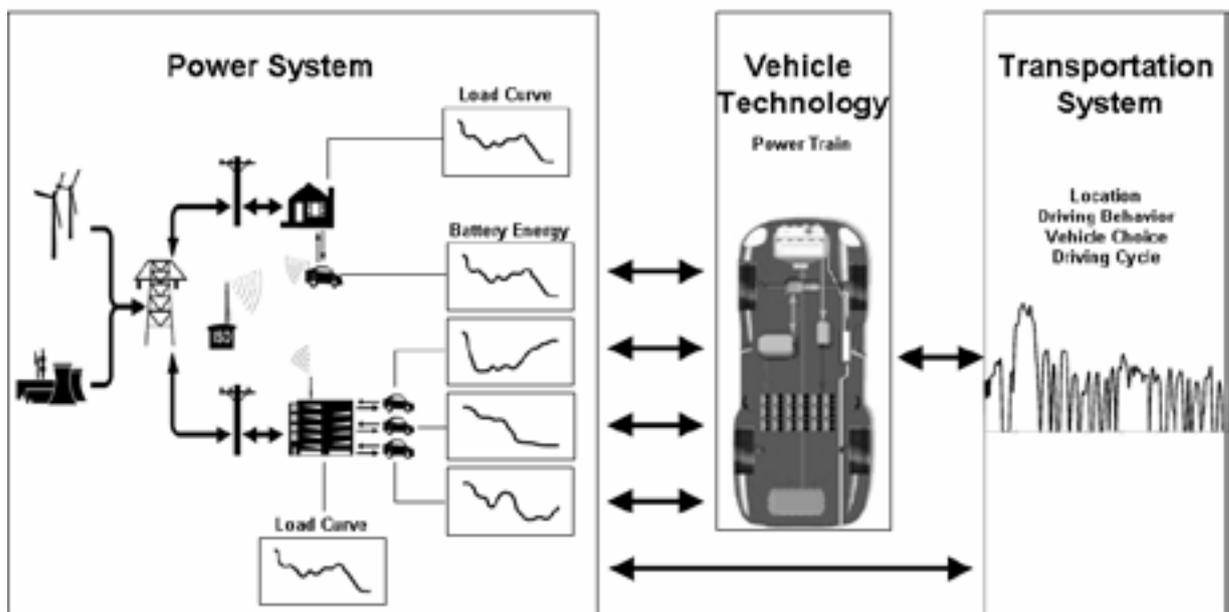
- [25] *Internetseite von EnergieSchweiz* und dem BFE www.energie-schweiz.ch
- [26] *Internetseite von Swiss Electric Research* (Organisation der schweizerischen Stromverbundunternehmen) www.swiss-electric-research.ch
- [27] *Internetseite der Energieagenturen* www.energieagentur.ch und www.energie-agentur.ch und www.eae-geraete.ch
- [28] *Internetseite für IEE-Projekt* www.efficient-server.eu
- [29] *Internetzugriff der EU bezüglich den CoC-Aktivitäten* www.energyefficiency.jrc.cec.eu.int/html/standby_initiative.htm
- [30] *Internetseite des Motor Challenge Programms* www.motorchallenge.ch
- [31] *Internetseite des Forschungsprogramms* www.electricity-research.ch. Download von Zusammenfassungen, Jahres- und Schlussberichten durchgeführter Forschungsarbeiten

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

PROGRAMM NETZE

Thilo Krause

thilo.krause@bfe.admin.ch



Verknüpfung von Verkehrs- und Elektrizitätsinfrastrukturen

Durch neue Fahrzeugtechnologien (*Plug-In Hybrid Cars*) kann es zukünftig möglich sein, Synergien zwischen individueller Mobilität und Elektrizitätsnetzen zu nutzen, um den Gesamtenergieverbrauch zu senken. (Quelle: ETH Zürich unter Nutzung von [6] und [7]).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Mit seiner Gründung im Jahr 2006 ist das Forschungsprogramm Netze durchaus noch als «junges» Programm zu bezeichnen. Schwerpunkte der Arbeiten lagen diesbezüglich in der weiteren Konkretisierung der Forschungsziele und in der nationalen und internationalen Vernetzung. Zur Bestimmung der zukünftigen Programminhalte bzw. der Programmausrichtung wurde im Herbst 2007 das **Detailforschungskonzept «Netze»** vor der Eidgenössischen Energieforschungskommission (CORE) präsentiert. In Abstimmung mit der CORE wurden die folgenden Tätigkeitsfelder identifiziert:

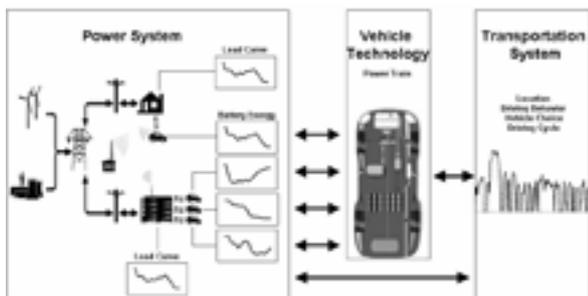
- Elektrizitätsnetze
- Gekoppelte Energienetze (Elektrizität, Gas, Wärme)
- Effiziente Technologien für Energienetze.

In obigen Bereichen sind die Auswirkungen des sich verändernden technologischen, ökonomischen und legislativen Umfelds auf Netzbetrieb und Versorgungszuverlässigkeit zu untersuchen, sowie die Konzeption von neuartigen Netzinfrastrukturen (regional bis transnational) unter Einbezug von vermehrter dezentraler Erzeugung und von Energiespeichern. Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Erarbeitung von Konzepten zu effizientem Design und Management der «Energiedrehscheibe Schweiz». Dabei sind Fragen zu Netzregulierung, Engpassmanagement, langfristigen Netzausbau und der Abhängigkeit von Gas-, Strom- und Wärmenetzen zu bearbeiten.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

Im Folgenden werden die im Berichtsjahr vom BFE direkt begleiteten Projekte kurz skizziert. Im Anschluss an die Projektbeschreibungen werden Ideen bezüglich neuer Aktivitäten aufgezeigt.

Als interdisziplinäres Projekt zu den Themen Mobilität und Elektrizität wurde die Vorstudie **Integration von Plug-In Hybrid Cars zur Förderung intelligenter Verteilnetzstrukturen** abgeschlossen [1]. Ziel war es, den **Einfluss von neuen Fahrzeugtechnologien auf Elektrizitätsnetze** zu untersuchen. Im Mittelpunkt stand dabei das **Vehicle-to-Grid** Konzept (V2G) (Figur 1).



Figur 1: Schematische Darstellung des Vehicle to Grid Concepts (V2G) (Quelle: ETH-Zürich unter Nutzung von [6] und [7]).

So genannte Plug-In Hybrid Fahrzeuge, die über einen Elektro- und einen Verbrennungsmotor sowie über eine Batterie verfügen, werden mittels Hausanschluss bzw. speziellen Ladestationen mit dem Verteilnetz verbunden. Bei einer zukünftig hohen Durchdringung von *Plug-In Hybrid* Fahrzeugen kann über intelligente Kommunikationseinrichtungen auf die Batterien als verteilte Regelreserve zurückgegriffen werden, d.h. die

Fahrzeuggatterien können kurzfristig ge- oder entladen werden und damit Regelernergie bzw. -leistung zur Verfügung stellen. Die Studie kommt zum Schluss, dass auf der technischen Seite bereits ermutigende Resultate bezüglich einer Machbarkeit des V2G-Konzepts vorliegen. Auch ökonomisch existieren Ideen zur Erschließung neuer Geschäftsfelder. In Zukunft ist es nötig, die Erfolgsfaktoren für die Integration von Plug-In Hybrid Fahrzeugen in Verteilnetze umfassend zu untersuchen. Bestrebungen dazu sind seitens der ETH-Zürich vorhanden, die ein Projekt lanciert hat, dass auf die integrierte Modellierung von Verkehrs- und Elektrizitätsinfrastrukturen abzielt. Das Projekt trägt den Namen **Integrated Modeling and Analysis of Energy and Transportation Systems**. Eine Beteiligung des BFE wird geprüft. Darüber hinaus besteht für 2008 die Idee der Etablierung eines Arbeitskreises zum Thema Plug-In Hybrid Cars und Elektrizitätsnetze. Damit soll der momentan wachsenden Vernetzung von Infrastruktursystemen Rechnung getragen werden.

Im Projekt **Vision of Future Energy Networks** [2] wurden die Arbeiten zur **Erstellung von Szenarien für zukünftige Energiesysteme** fortgesetzt und ausgebaut. Eine zentrale Rolle im Projekt nimmt der so genannte «Energy Hub» ein, der es ermöglicht, die Erzeugung aus einer bestimmten Anzahl dezentraler Quellen miteinander zu koppeln. Die verschiedenen Energieformen können im *Energy Hub* ineinander umgewandelt oder auch gespeichert werden, um eine hohe Versorgungssicherheit zu gewährleisten. In den Vorjahren wurden Arbeiten zu den Themen «Modellierung von Speichersystemen», «Modellierung der Energieflüsse», «Modellierung der Zuverlässig-

keit» und «Energieübertragung» durchgeführt. Die bestehenden Arbeitspakete wurden im Berichtsjahr durch folgende Aktivitäten erweitert:

- *Investitionsstrategien für Systeme mit mehreren Energieträgern*

Traditionelle Energieplanung, wie sie heute grösstenteils praktiziert wird, konzentriert sich darauf, die kostengünstigste Erzeugungsalternative zu bestimmen. Im heutigen, immer dynamischer und komplexer werdenden Umfeld ist es jedoch kaum unmöglich, die kostengünstigste Alternative für die nächsten 30 Jahre vorherzusagen. Die moderne Finanztheorie liefert bessere Werkzeuge für die Miteinbeziehung von Risiko- und Unsicherheitsfaktoren in die Planung. In diesem Teil des Projekts werden solche Werkzeuge auf Systeme mit mehreren Energieträgern angewendet, um effiziente Investitionsstrategien für die Zukunft zu entwickeln.

- *Dezentrale Regelung für Systeme mit mehreren Energieträgern*

Ziel des Teilprojektes ist es, mehrere Energieträger in einem geschlossenen System zu optimieren und deren Kopplungen und Interaktionen zu berücksichtigen. Als Basis dient ein allgemeiner Modellierungs- und Optimierungsansatz, der sich auf statische Modelle stützt. Untersucht wird die Optimierung sowohl eines einzigen Energy Hubs als auch eines Netzes von verbundenen Hubs. Dabei sind die einzelnen Hubs mittels einer Regelstruktur verwaltet (siehe Figur 2).

- *Multi-Energieträgerübertragung*

Ziel ist die Entwicklung einer Übertragungstechnologie, die es erlaubt verschiedene Energieträger in einem einzigen Medium zu übertragen.

- *Fallstudie Energy Hub Baden-Dätwill*

Ziel des Arbeitspaketes ist die Anwendung der bisher theoretisch erarbeiteten Konzepte auf einen realen Netzwerkausschnitt in der Stadt Baden.

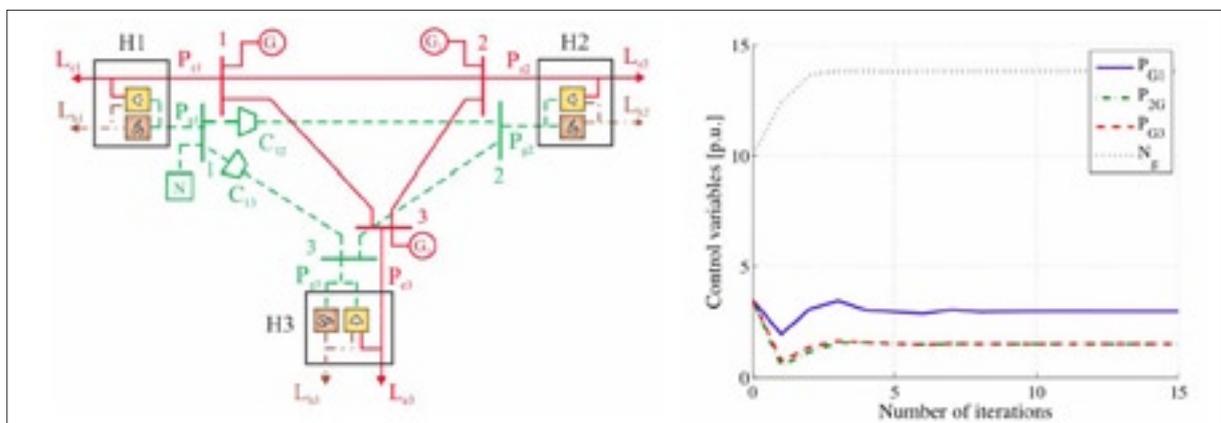
Für das Jahr 2008 ist die Fortführung obiger Aktivitäten vorgesehen. Wichtig sind die Sicherstellung der Finanzierung von Industrieseite sowie die Festigung der nationalen und internationalen Zusammenarbeit.

Basierend auf den in **Vision of Future Energy Networks** geleisteten Arbeiten wurde im Berichtsjahr eine Vorstudie zum Thema **Analysis and Scenarios of Energy Infrastructure Evolution** durchgeführt [3]. Die Vorstudie wurde in Bezug auf eine Projektausschreibung innerhalb des 7. Forschungsrahmenprogramms der Europäischen Union lanciert. In der Ausschreibung der EU heisst es dazu [10]:

«Taking into consideration the vision of the Smart-Grids Technology Platform, activities are intended to cover a thorough analysis of the prospective energy technologies and their gradual incorporation into today's transmission and distribution networks. This analysis should comprise the development of a roadmap for the coming 30-40 years outlining technology-driven changes of the Europe-wide electricity and gas networks, based on different scenarios.»

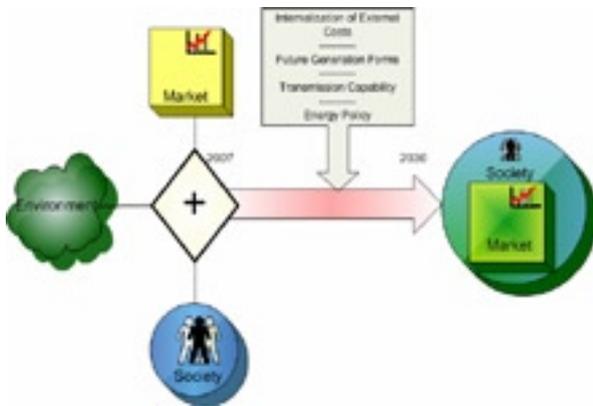
Die in der Vorstudie geleistete Arbeit diente als Grundlage zur Formulierung eines Projektantrages an die Europäische Union. Darüber hinaus konnte ein kompetentes Konsortium gebildet werden (siehe Abschnitt Internationale Zusammenarbeit). Der Antrag wurde seitens der EU positiv evaluiert. Das Konsortium ist zu Verhandlungen mit der EU eingeladen. Es ist davon auszugehen, dass zukünftig eine substantielle Finanzierung von EU-Seite erfolgen wird.

Im Berichtsjahr neu lanciert wurde das Projekt **Towards Future Electricity Networks** [4]. Im Mittelpunkt der Arbeiten steht ein zukünftiges, «nachhaltiges» Elektrizitätsnetz, wobei die bisher nicht berücksichtigten externen Kosten für die Energieerzeugung und -übertragung internalisiert werden sollen, um



Figur 2: Iterative Regelung eines Multi-Energieträgernetzes basierend auf Energy Hubs. Links ist die Netzstruktur dargestellt. Die rechte Abbildung zeigt das Verhalten der Regelvariablen. Nach einer «Einschwingzeit» erreichen die Energy Hubs den optimalen Betriebspunkt. (Quelle: ETH-Zürich).

- technisch, ökonomisch *und* ökologisch optimale Netzbestriebsstrategien abzuleiten;
- Ausbauprojekte zur Netzoptimierung unter Einbeziehung technischer, ökonomischer und ökologischer Kenngrößen zu identifizieren.



Figur 3: Schematische Darstellung Zielsystem «Towards Future Electricity Networks» (Quelle: Power Systems Laboratory, ETH- Zürich).

Im Projekt werden dabei explizit liberalisierte Marktstrukturen berücksichtigt, sowie die Möglichkeit des Auftretens von Netzengpässen (Figur 3). Im Anschluss an die konzeptionelle Projektarbeit werden Fallstudien für das Schweizer sowie das europäische Übertragungsnetz durchgeführt. Das Projekt stützt sich dabei in einem ersten Schritt auf «klassische Werkzeuge» im Bereich Netzbetrieb und Strommärkte. Dazu gehören der so genannte «optimale» Lastfluss sowie Verfahren zu Netzplanung und -ausbau. Für das Jahr 2008 ist die Erweiterung dieser Konzepte, um relevante Kenngrößen zur Abbildung ökologischer und gesellschaftsrelevanter Aspekte geplant. Das Projekt wird in Zusammenarbeit mit der Chalmers University of Technology in Schweden durchgeführt. Unterstützung von Industrieseite gewährt *Vattenfall AB*, Schweden. Zukünftig ist die Integration von weiteren Industriepartnern vorgesehen.

Einen wichtigen Schwerpunkt der Aktivitäten im Berichtsjahr bildete das Projekt **Verteilte Einspeisung in Niederspannungsnetze** [5]. Ziel ist es, die Auswirkungen eines vermehrten Einsatzes von dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) in Niederspannungsnetzen zu erforschen. Im Mittelpunkt der Arbeiten steht ein «Feldversuch», d.h. der tatsächliche Einbau von dezentralen Erzeugungsanlagen in einen geeigneten Netzausschnitt. Die dazu notwendigen Abklärungen, wie z.B. die Definition des Netzausschnitts, sowie die Identifikation von Pilotanlagen wurden bereits durch Vorprojekte bzw. Vorstudien getroffen. Aufgrund des umfangreichen Kenntnisstands aus den bisher geleisteten theoretischen Arbeiten hat sich die Projektleitung im Jahr 2007 entschlossen, die

«operative» Projektphase zu beginnen. Entsprechend der ausgearbeiteten Umsetzungsstrategie werden im Sommer 2008 die ersten dezentralen Erzeugungsanlagen in den Netzausschnitt Kreuzmatt in Rheinfelden eingebaut. Ziel ist die Schaffung eines «Pilotnetzes», das es erlaubt die folgenden Fragestellungen zu untersuchen [11]:

- Wie verändern sich Struktur und Betriebsführung des Niederspannungsnetzes durch den zunehmenden Einsatz der dezentralen Erzeugung?
- In welchem Rahmen verändert sich die Versorgungszuverlässigkeit von Niederspannungsnetzen?
- Wie kann die durch den Einsatz von DEA entstehende «Lastflussumkehr» im Niederspannungsnetz betrieblich gehandhabt werden?
- Ist ein partieller Inselbetrieb mit dem Einsatz von DEA möglich und nach Massgabe von Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität machbar?
- Wie weit können mit dem wachsenden Anteil einer dezentralen Energieerzeugung und der damit verbundenen Einspeisung in das Niederspannungsnetz Netzkosten in der Energieübertragung vermieden werden?
- Welche Verlusteinsparungen sind durch den Einsatz von dezentralen Erzeugungsanlagen möglich?

Zur Bearbeitung obiger Problemstellungen ist es unumgänglich die Basis von kompetenten Projektpartnern auf Hochschul- und Industrieseite zu erweitern und darüber hinaus eine zweckmässige Struktur zum Management der verschiedenen Forschungsaktivitäten zu etablieren. Schwerpunkt der Tätigkeit im Berichtsjahr war der Kontakt und die Vernetzung möglicher Akteure für die Projektarbeit. Von Hochschul- bzw. Fachhochschulseite haben Interesse zur Mitarbeit bekundet: die ETH Zürich und Lausanne, die Fachhochschulen Nordwestschweiz, Sion, Luzern, Fribourg, und Bern. Von Industrieseite sind im Projekt momentan die folgenden Partner vertreten: *AEW Energie, Bernische Kraftwerke, Centralschweizerische Kraftwerke, Industrielle Werke Basel, Elektrizitätswerk des Kantons Zürich, Wasserwerke Zug*. Die breite Abstützung lässt für das kommende Jahr auf eine innovative Projektarbeit hoffen, die sowohl Anwendungs- wie auch Forschungsfragen verbindet. Das Thema **Verteilte Einspeisung in Niederspannungsnetze** fügt sich auf internationaler Ebene in den Kontext von so genannten **Smart Distribution Grids**. Im nationalen Kontext besteht die Chance der Etablierung einer «Plattform» zu intelligenten Verteilnetzen, die Industrie-fragestellungen genauso berücksichtigt wie Forschungs- und Ausbildungsaspekte.

Über die bereits implementierten Projekte hinaus, existieren **weitere Vorschläge** zu Forschung in den folgenden Bereichen:

- *Modellierung der Interdependenz von kritischen Infrastrukturen, speziell von Kommunikations- und Stromnetzen;*
- *Technischer und ökonomischer Nutzen von innovativen Speicherkonzepten im Schweizer Elektrizitätsnetz;*
- *Pan-europäische Übertragungstechnologien zur Integration von Off-Shore Windanlagen (Stichworte: Hochspannungs-Gleichstromübertragung, Flexible AC Transmission Systems, European SuperGrid);*
- *Effizienzsteigernde Verteilnetztechnologien (Stichworte: Leistungselektronik, Multilevel-Converter, Gleichstromübertragung im Verteilnetz, dezentrale Speichertechnologien).*

Im Jahr 2008 wird angestrebt aus obigen Ideen konkrete Projekte zu entwickeln. Kontakt zwischen potentiellen Forschungsinstitutionen und eventuellen Förderern wurde bereits hergestellt. Auf Förderseite zu nennen sind: Stiftung Novatlantis, Competence Center for Energy and Mobility im ETH Bereich sowie Swisselectric Research.

Nationale Zusammenarbeit

Einen wichtigen Schwerpunkt der Aktivitäten im Berichtsjahr bildete die nationale Vernetzung der Programmaktivitäten, d.h. das Identifizieren relevanter *Stakeholder* in den Bereichen Elektrizitäts- bzw. Energienetze und Energietechnik. Zu diesem Zweck wurden alle Hochschulen kontinuierlich besucht. Im Mittelpunkt stand die Identifikation möglicher Projekte bzw. der Abgleich von Forschungs- und Ausbildungszielstellungen. Im August 2007 präsentierte die Programmleitung das Programm «Netze» darüber hinaus auf dem **1. Schweizer Energietechnikforum** [8]. Anwesend waren Vertreter der Strombranche, der Hochschulen sowie der Politik. In diesem Sinne kann bezüglich der Vernetzung des Programms eine positive Bilanz gezogen werden; relevante *Stakeholder* wurden identifiziert, das Programm «Netze» ist auf nationaler Ebene «sichtbarer» geworden. Dazu beigetragen hat auch die Entwicklung eines **Internetauftritts**, der alle relevanten Informationen zu Zielsetzung, Projekten und Antragstellung beinhaltet [9].

Auf Projektebene kam es zu folgenden Zusammenarbeiten bzw. Kontakten:

- Das Projekt **Vision of Future Energy Networks (VoFEN)** [2] arbeitet zusammen mit: *ABB, Siemens, Areva, Swisspower* und den *Regionalwerken Baden*;
- Innerhalb des Projektes **Verteilte Einspeisungen in Niederspannungsnetze (VEiN)** [5] wird zusammengearbeitet mit: *AEW Energie AG, BKW FMB Energie AG, Centralschweizerische Kraftwerke, Elektrizitätswerk des Kantons Zürich, Elektrizitätswerk der Stadt Zürich, Wasserwerke Zug AG, Industrielle Werke Basel*;
- Im Rahmen des Projektes **Integration von Plug-In Hybrid Cars zur Förderung von intelligenten Verteilnetzen** [1] führte die Projektleitung umfangreiche Expertenbefragungen durch. Expertise wurde u.a. eingeholt von: *Branchenverband der Schweizerischen Elektrizitätsunternehmen (VSE), Toyota Schweiz, Swisgrid AG, Kraftwerke Oberhasli AG, Schweizerischer Verband für elektrische und effiziente Strassenfahrzeuge (E'mobile)*.

Internationale Zusammenarbeit

Seit Gründung des Forschungsprogramms Netze besitzt die internationale Zusammenarbeit einen hohen Stellenwert. Um die starke Verknüpfung mit dem europäischen Ausland zu repräsentieren, wurden die internationalen Aktivitäten weiterverfolgt bzw. intensiviert. Aktivitäten finden dabei sowohl auf Projekt- als auch auf Programmebene statt.

Auf Projektbasis 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. Internationale Kooperationen bestanden dabei wie folgt:

- Im Projekt **Analysis and Scenarios of Energy Infrastructure Evolution** [3] wurde zu-

sammengearbeitet mit: *Areva T&D, TU Delft, ECN (Energy center of the Netherlands), ETH Zürich, Imperial College London, National Technical University of Athens, RWTH Aachen, ABB und Siemens Power Transmission and Distribution*.

Auf Programmebene steht weiterhin die Mitarbeit in den Forschungsgremien der Europäischen Union und der Internationalen Energieagentur im Mittelpunkt. Dazu ist das Programm Netze innerhalb der europäischen **Technologieplattform SmartGrids** [12] vertreten. Die Plattform ist ein wichtiger Baustein im 7. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union und hat es sich zum Ziel gesetzt, einen Beitrag zu einer zuverlässigen und nachhaltigen Energiezukunft zu leisten. Zukünftig wird die Programmleitung hier für die

Leitung der strategischen Aktivitäten zuständig sein, d.h. auf europäischer Ebene einen Beitrag zur Entwicklung eines nachhaltigen Stromnetzes bzw. -marktes leisten. Im Berichtszeitraum wurde die Arbeit am so genannten *Strategic Deployment Document* (SDD) begonnen, das Optionen zur Weiterentwicklung der europäischen Netze darstellen soll. Im Mittelpunkt stehen «*Business Cases*», die detaillierte Ausführungen zu den wichtigsten Technologien, ihren Kosten und Nutzen in Bezug auf eine zukünftige Implementierung enthalten werden.

Innerhalb des *IEA Implementing Agreements Electricity Networks Analysis Research and Development (ENARD)* [13] sind drei neue *Annexes* in Vorbereitung, die sich mit Fragen der Integration dezentraler Einspeisungen, mit *Asset Management* sowie mit aktuellen Herausforderungen für Übertragungsnetze beschäftigen werden. Das Programm Netze strebt eine Schweizer Beteiligung in den einzelnen *Annexes* an, wobei es gilt, Institutionen aus Industrie oder Forschung zu integrieren, um vorhandenes Expertenwissen effizient zu nutzen bzw. auszubauen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Rahmen des Projekts *Vision of Future Energy Networks* [2] wurde in den vergangenen Jahren Forschung zur optimalen Architektur zukünftiger Energienetze geleistet. Die theoretisch gewonnen Erkenntnisse werden nun sukzessive auf reale Anwendungsfälle übertragen. Im Berichtsjahr fand eine Zusammenarbeit zwischen der ETH-Zürich und der Stadt Baden statt. Schwerpunkt der Kooperation bildete die Modellierung und Analyse eines Netzausschnitts in Baden-Dättwil. Hierzu wurden die im Forschungsprojekt entwickelten Simulationswerkzeuge eingesetzt, um Effizienzgewinne im Netzbetrieb zu realisieren bzw. Szenarien für eine zukünftige Netzgestaltung zu entwickeln. Für die kommenden Jahre sind weitere Fallstudien in Kooperation mit *Swisspower* und der Stadt Bern geplant. Die potentielle Anwendbarkeit sowie die

Relevanz der geleisteten Forschungsvorhaben im Rahmen des Projekts wurden darüber hinaus durch die Verleihung des Innovationspreises der Elektrotechnischen Gesellschaft (ETG) unterstrichen. Ausgezeichnet wurde Dr. Gaudenz Koeppl für seine Arbeit «*Reliability Considerations of Future Energy Systems: Multi-Carrier Systems and the Effect of Energy Storage*».

Innerhalb des Projektes *Verteilte Einspeisung in Niederspannungsnetze* [5] wurden detaillierte Arbeiten geleistet, um im Jahr 2008 einen «Feldversuch» zu starten, d.h. dezentrale Erzeugungsanlagen in einen Netzausschnitt in Rheinfelden einzubauen und damit einen praktischen Beitrag zu Fragen von intelligenten Verteilnetzen zu leisten.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Im Berichtsjahr wurde intensiv an der Vernetzung des Forschungsprogramms auf nationaler und internationaler Ebene gearbeitet, die weiterhin als Zielsetzung für das Jahr 2008 gilt. In der Schweiz erarbeitetes Projektwissen, soll in europäische Gremien eingebracht werden. Wünschenswert ist auch die Schaffung von europäischen Projektkonsortien, d.h. das Lancieren von Projekten mit Schweizer und internationalen Partnern. Ein starkes Signal in diese Richtung ist die positive Evaluation des Projekts *Infrastructure Roadmap for Energy Networks in Europe IRENE-40*. Das Projekt wird Anfang 2008 innerhalb des 7. Forschungsrahmenprogramms der Europäischen Union zur Verhandlung kommen. Eine substantielle finanzielle Unterstützung durch die Europäische Union gilt als gesichert und ermöglicht die Arbeit an netzrelevanten Themenstellungen über die Finanzierung des BFE hinaus. Weiterhin soll das Fortbestehen von nationalen Projekten, die sich dem Ende ihrer Laufzeit nähern, sichergestellt werden. Zusätzlich sind ca. 5 neue Projekte in Vorbereitung, teilweise in Zusammenarbeit mit *SwissElectric Research*, dem Forschungsfond der

Schweizerischen Übertragungsnetzbetreiber. Auf strategischer Ebene wird für das Jahr 2008 die Bildung einer Begleitgruppe angestrebt, die als Expertengremium zur Beratung der Programmleitung fungieren soll. Die wichtigsten Meilensteine im Berichtsjahr waren:

- Auf Programmebene:
 - Formulierung des ERA-NETs «Smart-Grids» mit der Schweiz als *Work Package Leader* «*Strategic Activities*» (Projekt genehmigt / Start der Verhandlungen mit der EU erwartet für das erste Quartal 2008)
 - Mitgestaltung des 1. Schweizer Energie-technikforum sowie Präsentation des Forschungsprogramms vor Vertretern aus Industrie, Wirtschaft, Forschung und Politik (Veranstaltung unter Leitung von *Electro-suisse*)
 - Präsentation des Detailforschungskonzepts «Netze» für die Jahre 2008 bis 2011 vor der Eidg. Energieforschungskommission (CORE)

- Erarbeitung des Webauftritts des Programms, zu erreichen unter www.bfe.admin.ch/forschung/netze
 - Regelmässige Vertretung des Programms «Netze» im *IEA Implementing Agreement «Electricity Networks Analysis Research and Development ENARD* sowie in der Europäischen Technologieplattform «SmartGrids» mit Dr. Rainer Bacher als *Session Chairman* bei der Generalversammlung der Plattform im Kloster Banz (DE)
 - «Antrittsbesuche» bei Schweizer Hochschulen und Fachhochschulen zum Abgleich von Forschungs- und Ausbildungsinteressen von Programm- und Institutsseite.
 - Auf Projektebene:
 - Initiierung von drei neuen Forschungsprojekten unter nationaler und internationaler Beteiligung
 - Leitung des Teilprojekts «Wissenschaftliche Begleitung» im Rahmen der **Verteilte Einspeisung in Niederspannungsnetze** zur Erweiterung der wissenschaftlichen Aktivitäten und zur Gewinnung neuer akademischer Partner
 - Unterstützung des Antrags **Infrastructure Roadmap for Energy Networks in Europe IRENE-40** innerhalb des 7. Forschungsrahmenprogramms (Projekt genehmigt / Verhandlung erwartet für das erste Quartal 2008)
 - Vorbereitung fünf weiterer nationaler Projekte mit dem Ziel der Lancierung im Jahr 2008.
- Für das Jahr 2008 liegen die Schwerpunkte auf folgenden Tätigkeiten:
- Auf Programmebene:
 - Etablierung einer Begleitgruppe zur strategischen Beratung der Programmleitung;
 - Mitarbeit beim Aufbau des ERA-NETs «SmartGrids», Beginn der Tätigkeit für das *Work Package «Strategic Activities»*;
 - Kontinuierliche Weiterbegleitung der Aktivitäten bei der Internationalen Energieagentur IEA und der Europäischen Technologieplattform «SmartGrids»;
 - Öffentliche Präsentation des Forschungsprogramms bei entsprechenden Veranstaltungen.
 - Auf Projektebene:
 - Intensivierung der Aktivitäten im Bereich integrierte Modellierung von Elektrizitäts- und Verkehrsinfrastrukturen;
 - Weitere Begleitung des Teilprojekts «Wissenschaftliche Begleitung» im Rahmen der **Verteilte Einspeisung in Niederspannungsnetze**;
 - Weitere Betreuung aller laufenden Projekte, Lancierung neuer Projekte gemäss Vorarbeiten.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 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] R. Horbaty (robert.horbaty@enco-ag.ch), ENCO Energie-Consulting AG, **Integration von Plug-In Hybrid Cars zur Förderung intelligenter Verteilnetzstrukturen** (SB 102'205)
- [2] G. Andersson, K. Fröhlich (andersson@eeh.ee.ethz.ch), Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zürich, **Vision of Future Energy Networks** (JB 100'669)
- [3] P. Favre-Perrod (pfavre@eeh.ee.ethz.ch), Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zürich, **Analysis and Scenarios of Energy Infrastructure Evolution** (SB 102'131)
- [4] A. Papaemmanouil, G. Andersson (papaemmanouil@eeh.ee.ethz.ch), Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zürich, **Towards Future Electricity Networks** (JB 102'292)
- [5] P. Bühler, G. Schnyder (gilbert.schnyder@sing.ch), Schnyder Ingenieure, **Verteilte Energieeinspeisung in Niederspannungsnetze** (JB 101'411)

Referenzen

- [6] C. C. Chan: *The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*, Proceedings of the IEEE, Volume 95, Issue 4, 2007.
- [7] J. Tomic, W. Kempton: *Using fleets of electric-drive vehicles for grid support*, Journal of Power Sources, Volume 168, Issue 2, 2007.
- [8] Electrosuisse: **1. Schweizer Energietechnikforum**, Bern, 21. August 2007, Programm online verfügbar unter http://www.electrosuisse.ch/cms.cfm/s_page/77870.
- [9] BFE: *Internetauftritt BFE-Forschungsprogramm Netze*, online abrufbar unter <http://www.bfe.admin.ch/forschung/netze/>.
- [10] Europäische Union: **7. Forschungsrahmenprogramm – Call for Proposals**, Dezember 2006, online abrufbar unter http://cordis.europa.eu/fp7/dc/index.cfm?fuseaction=UserSite.CooperationDetailsCallPage&call_id=4.
- [11] R. Soland, P. Bomatter: *Verteilte Einspeisungen in Niederspannungsnetze*, Bulletin SEV/VSE, 06/07.
- [12] SmartGrids Konsortium: *Europäische Technologieplattform SmartGrids*, online verfügbar unter <http://www.smartgrids.eu>.
- [13] International Energy Agency: *IEA Implementing Agreement – Electricity Networks Analysis Research and Development*, online verfügbar unter <http://www.iea-enard.org>.

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

PROGRAMM UMGEBUNGSWÄRME, WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG, KÄLTE

Thomas Kopp, Fabrice Rognon

tkopp@hsr.ch, fabrice.rognon@bfe.admin.ch



Wärmepumpenanlage für Heizung und Warmwasserbereitung

Die Anlage in einem Mehrfamilienhaus besteht aus 2 parallel arbeitenden Wärmepumpen die Temperaturen bis 65 °C bereitstellen können. Somit sind sie auch für die Warmwasserbereitung geeignet.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Der Programmteil **Umgebungswärme** beschäftigt sich mit der Nutzung der in der Umgebung (Erde, Wasser, Luft) gespeicherten Energie mittels des thermodynamischen Kreisprozesses Wärmepumpe. Eine Wärmepumpe kann Wärme von tieferer, nicht-nutzbarer Temperatur auf eine nutzbare Temperatur anheben, sie benötigt dazu eine hochwertige Antriebsenergie zum Beispiel in Form von Elektrizität. Heutige Wärmepumpen können aus einem Teil elektrischer Energie je nach Randbedingungen 3 bis 6 Teile Nutzwärme erzeugen. Dieses Verhältnis (*Coefficient of Performance COP*) ist direkt abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur der Nutzwärme und der Temperatur der Wärmequelle und kann für den idealisierten Fall als Carnot-Faktor einfach berechnet werden:

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{Nutzwärme} [K]}{T_{Nutzwärme} [K] - T_{Wärmequelle} [K]}$$

Die reale Wärmepumpe produziert die Nutzwärme aber nicht direkt in den Wohnräumen und auch die Energie der Wärmequelle muss zuerst zur Wärmepumpe transportiert werden. Für die Wärmeübertragungsvorgänge muss jeweils eine Temperaturdifferenz vorhanden sein, sodass die theoretischen Werte mit heutigen Konstruktionen üblicherweise etwa um 50% sinken.

Der Programmteil **Wärme-Kraft-Kopplung (WKK)** versucht die chemische Energie in Brennstoffen energetisch bestmöglich in Wellenenergie (mechanische Energie an der Kurbelwelle) und nutzbare Abwärme umzuwandeln und der Programmteil **Kälte** untersucht Möglichkeiten, Temperaturniveaus unter der Umgebungstemperatur möglichst energieeffizient zu erreichen. Das Programm betrach-

tet die Randbedingungen an diese Anforderungen als gegeben, versucht aber, systembedingte Optimierungsmöglichkeiten ebenfalls aufzuzeigen. So kann zum Beispiel die Abwärme einer Kälteanlage als Nutzwärme eingesetzt werden.

Berechnungen zeigen, dass mit 4% der heute produzierten elektrischen Energie 400'000 Wärmepumpen betrieben werden könnten. Heute sind in der Schweiz 100'000 Wärmepumpen in Betrieb.

Die Gesamtenergiestatistik der Schweiz 2006 [21] zeigt, dass im Jahr 2006 der Verbrauch von Heizöl extra-leicht um 4.8% und von Erdgas um 1.9% gegenüber 2005 abnahmen. Die Haushalte benötigen aber immer noch 64% ihres gesamten Energiebedarfs in Form von Erdöl und Erdgas zur Bereitstellung ihrer Niedertemperatur-Wärme. Durch konsequenten Einsatz von Wärmepumpen und Wärme-Kraft-Kopplung könnte der Verbrauch an fossiler Energie für Gebäudeheizung und damit auch der CO₂-Ausstoss um 30 bis 50% verringert werden. Die Reduktion ist grösser, wenn die Wirkungsgrade der WKK-Anlage und der Wärmepumpe weiter gesteigert werden können.

Im Energieforschungskonzept des Bundes [22, 23] wird denn auch die Steigerung der Effizienz als erste Massnahme genannt. Daneben soll die Systemoptimierung betrachtet werden, das heisst die Verbesserung der Kopplung der verschiedenen technischen Systeme von Wärmequelle bis zum Nutztort durch eine ganzheitliche Betrachtung. Zur Förderung der Marktakzeptanz sollen die Herstellungs- und die Unterhalts-Kosten durch Standardisierungsanstrengungen gesenkt werden. Bei den Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen müssen die Schadstoffemissionen weiter gesenkt und die Steuerung und die Diagnose weiter verbessert werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

UMGEBUNGSWÄRME, WÄRMEPUMPEN

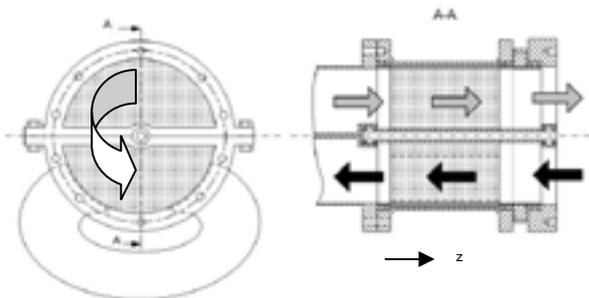
Im Herbst 2006 wurde in der Schweiz die 100'000ste Wärmepumpe in Betrieb genommen. Die Verkaufszahlen waren auch im 2007 sehr gut. Da die Wärmepumpe eine wichtige Rolle bei der Verminderung des CO₂-Austausches spielen kann, muss ihr Erfolg mit weiteren Verbesserungen und Eliminierung von Schwachstellen gewährleistet werden.

Klassische Kompressions-Wärmepumpen enthalten ein Kreislaufmedium, auch Kältemittel genannt. Kältemittel aus den 1980er Jahren hatten negative Umwelteinwirkungen, sie zerstörten die Ozonschicht und erhöhten den Treibhauseffekt. Die beiden Effekte werden mit dem ODP (*Ozon Depletion Potential*) und dem GWP (*Greenhouse*

Warming Potential) quantifiziert. Heutige Kältemittel enthalten kein Chlor mehr und gefährden somit die Ozonschicht nicht mehr (ODP = 0), sie enthalten jedoch noch Fluor und beeinflussen damit den Treibhauseffekt. Deshalb werden seit längerer Zeit die natürlichen Kältemitteln Ammoniak, Propan und Kohlendioxid untersucht.

Eine andere Variante wird bei der magneto-kalorischen Wärmepumpe beschritten, die Wärmeaufnahme bei tiefer Temperatur und die Wärmeabgabe bei hoher Temperatur wird über die Wechselwirkung der Magnetisierung von geeigneten Materialien erreicht. Die **Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz** [24] zeigte, dass nur die Variante Wärmepumpe für Fussbodenheizung mit Wärme-

quelle Erdsonde wirtschaftlich sein kann. Im an der Fachhochschule Yverdon gestarteten Projekt **Magnetische Wärmepumpe mit Erdwärme-Quelle: Optimierter Prototyp** [1] (Figur 1) soll nun eine Wärmepumpe aufgrund des magnetokalorischen Effektes konkret gebaut und ausgemessen werden.



Figur 1: Prinzip der magnetokalorischen Wärmepumpe: Ein magnetisierbarer Stoff verändert seine Temperatur wenn er in ein Magnetfeld gelangt oder dieses verlässt. Das Fluid oben führt dem rotierenden, magnetisierbaren Rad Quell-Wärme zu, das Fluid unten führt Nutz-Wärme ab. Der untere Teil liegt im Magnetfeld. (Quelle: Egolf et al., FHS Yverdon [1])

In modernen Gebäuden sind Fussbodenheizungen eingebaut, die für die Wärmepumpen vorteilhaft sind, da sie mit einer geringeren Vorlauftemperatur betrieben werden können als Radiatorenheizungen. Durch grössere Wärmeaustauschfläche in den Fussboden-Heizungsrohren kann die notwendige Vorlauftemperatur noch weiter gesenkt werden. Damit steigt der reale COP, da jetzt die notwendige Temperaturdifferenz für die Übertragung der Wärme aus dem Fussboden-Heizsystem an den Raum kleiner wird. Dieselben Überlegungen können auch für die Wärmequelleseite gemacht werden. Temperaturdifferenzen und Reibungsverluste sollen möglichst klein werden. Für eine für die Schweiz geeignete Erdsonde mit Tiefe von 200 bis 300 m wird im Projekt **CO₂-Erdwärmesonde, Phase 2** [2] an der HTA Luzern eine Lösung modelliert, die durch freie Konvektionsvorgänge im Innern der Erdsonde völlig ohne Umwälzpumpe funktionieren kann. Nach erfolgreicher Modellierung soll später ein Feldversuch gestartet werden.

Innerhalb der Wärmepumpen wird ein thermodynamischer Kreisprozess betrieben. Hauptkomponenten sind ein Kompressor und die beiden Wärmetauscher: Verdampfer und Kondensator. Jede dieser Komponenten hat ihren eigenen Wirkungsgrad. Das Projekt **WEXA Exergieanalyse im Dienste der Verbesserung von Luft-Wasser-Wärmepumpen** [3] untersuchte systematisch alle verlustbehafteten Vorgänge und konnte daraus die lohnendsten Verbesserungsmaßnahmen ableiten. Die grössten Verluste fallen im Kompressor und im Verdampfer an. Sie lassen sich durch eine

Drehzahlregelung massiv verkleinern. Da diese Arbeit auch international von grossem Interesse ist, wurde eine englische Übersetzung in Auftrag gegeben.

Die bescheidene Einflussmöglichkeit des BFE auf die Kompressor-Hersteller wird nach Möglichkeit ausgeübt. Trotzdem muss das BFE – wie auch alle Wärmepumpen-Hersteller – darauf warten, bis die Stückzahlen gross genug werden, dass sich eine Anpassung der Kompressoren durchsetzen lässt. Diese Situation wird in den nächsten Jahren erreicht sein, es gibt bereits erste spezielle Kompressorkonstruktionen, zum Beispiel für CO₂-Wärmepumpen. Auch können nun Serien-Kompressoren mit Propan betrieben werden, ohne dass dafür vom Hersteller die Garantien wegbedungen werden.

Bei der Optimierung der Wärmetauscher sind die Möglichkeiten besser, vor allem bei Luft-Wasser-Wärmepumpen. Das Projekt **LOREF2 Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung: Optimierung des Lamellenluftkühlers/Verdampfers von Luft/Wasser-Wärmepumpen** [4, 5] wurde 2007 abgeschlossen. Neben zahlreichen theoretischen Ergebnissen, die sehr gut mit den Messungen übereinstimmen, ist das Resultat jedoch ernüchternd. Es zeigt sich nämlich, dass die verschiedenen Luftkühler nur marginale Unterschiede in der resultierenden Jahresarbeitszahl (JAZ) von ca 1.8% zeigen. Man hat aber erkennen können, dass der Ventilator gut auf den Verdampfer abgestimmt sein und in seinem Bestpunkt arbeiten sollte. Ein weiteres Ergebnis ist, dass wenn immer möglich Naturabtauung eingesetzt werden sollte. Bei geeignetem Luftzustand kann der Bedarf an elektrischer Energie pro Abtauzyklus um bis zu einem Faktor 10 reduziert werden.

Bei zukünftigen Wärmepumpen dürften aufgrund der damit erreichbaren höheren Wirkungsgrade vermehrt frequenzgeregelt Antriebe eingebaut werden. Eine Erhöhung des Wirkungsgrades kann auch mit einer neuartigen Laderegelung erwartet werden, indem schon die Vorlauftemperatur im Zwischenkreis durch Variation des Massenstromes witterungsabhängig geregelt wird. Bei höheren Aussentemperaturen wird der Massenstrom im Zwischenkreis erhöht und damit die Spreizung des Heizungswassers im Kondensator verkleinert. Damit muss die Wärmepumpe eine geringere Wärmeabgabetemperatur erreichen und der Wirkungsgrad wird erhöht. Das Projekt **Witterungsgeführter Laderegler** [6] verfolgt diese Strategie in 2 Feldanlagen, wobei aber momentan noch nicht alles störungsfrei läuft. Es hat sich auch gezeigt, dass wärmepumpen-betriebene Heiz-Systeme mit Radiatoren einen Speicher haben sollten, damit längere Sperr- und Betriebszeiten möglich werden.

Heutige Wärmepumpen können heizen und sollten auch geeignet sein für die Bereitung des sanitären Brauch-Warmwassers. Hier ist die Feinplanung sehr wichtig, damit die Erwärmung vor allem über die Wärmepumpe und nicht durch die üblichen Begleitheizungen geschieht. Das Projekt **Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe** [7a] wurde Mitte 2007 abgeschlossen. Es hat gezeigt, dass Warmwasser immer auch mit Wärmepumpen produziert werden kann. Ebenfalls konnten die vor 5 Jahren im Rahmen des **STASCH-Projektes Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen** [25] abgegebenen Empfehlungen bestätigt werden. Im Projekt wurden innenliegende Rohrbündelwärmetauscher und aussenliegende Plattenwärmetauscher verglichen. Mit aussenliegendem Wärmetauscher gemäss STASCH konnten Warmwassertemperaturen im Speicher von 57 °C bei einer Leistungszahl von 3.15 erreicht werden. Der innenliegende Wärmetauscher mit einer Fläche von ca 60% der STASCH-Empfehlung erreichte 51 °C und eine Leistungszahl von 3.16. Falls Temperaturen von über 60 °C erreicht werden sollen, kann nur eine sekundärseitige Laderegelung helfen, die im Projekt aus den vorhandenen Daten simuliert wurde. Das wegen der Legionellengefahr grosse Interesse an hohen Wassertemperaturen war denn auch der Anlass, eine Phase 2 **Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe und sekundärseitiger Laderegelung** [7b] zu starten. Als Ziel werden Empfehlungen erwartet, die mit handelsüblichen Wärmepumpen gute Arbeitszahlen mit Stufenladungen bis ca 55 °C vorbereiten und mittels sekundärseitiger Laderegelung im Antilegionellenbetrieb eine Durchladung bis über 60 °C ebenfalls noch mit akzeptabler Leistungszahl erreichen.

Wärmepumpen werden zunehmend auch in kombinierten Anlagen mit thermischer Sonnenenergienutzung eingesetzt. Dabei ist die befriedigende Integration noch nicht überall gelungen und es zeigen sich Informationslücken in der Branche. Das BFE hat 2 Projekte zur Verbesserung und Verbreitung von Kombianlagen Wärmepumpe und Solarthermik gestartet. Im Projekt **Simulation von Wärmepumpensystemen in Polysun 4** [8] wird ein Modul Wärmepumpen integriert. Die Software Polysun wurde ursprünglich zur Simulation von Solaranlagen entwickelt und hat heute dank der vorhandenen Flexibilität bei der Anlagenkonfiguration und dem breiten Datensatz in der gesamten Planungsbranche eine grosse Verbreitung erlangt. Nach Abschluss des Projektes kann die Software Anlagen simulieren, die aus klassischen, auf dem Markt erhältlichen Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen und Solarkomponenten bestehen. Im Projekt **SOL-PAC Analyse des performances du couplage d'une pompe à chaleur avec une installation solaire thermique pour la rénovation** [9] wird

nach den effizientesten Schaltungen gesucht, die aus einer Kombination einer Luft-Wasser-Wärmepumpe und thermischen Solarkollektoren bestehen. Diese Kombination würde sich vor allem für Renovationsobjekte eignen, die einen Oel- oder Gaskessel ersetzen müssen. Es ist geplant, aus 4 Varianten die Energie- und Kosteneffizienz zu simulieren und sie mit dem Referenzfall Ölheizung zu vergleichen. Bei ansprechenden Resultaten soll später eine geeignete Anlage ausgemessen werden.

Mit grossen Wärmepumpen mit Wärmeleistungen bis über 500 kW wird trotz der kleinen Stückzahlen ein bedeutendes energetisches Potential abgedeckt. Im Projekt **Grosswärmepumpen – Energetische und planerische Analyse von 10 Anlagen und Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte** [26] wurden 10 Grosswärmepumpen untersucht. Es zeigte sich, dass die Wirkungsgrade dieser jeweils auftragsabhängig engineeringen Wärmepumpen schlechter sind als die Serien-Wärmepumpen mit kleineren Leistungen. Als Ursache dieser schlechteren Leistungszahlen wurden die Verluste in den Grobverteilnetzen, der Warmwasserbereitung und -verteilung und den quellenseitigen Nebenantrieben (vor allem Pumpen) identifiziert. Als Grundlage für Planer und Installateure sollen im neuen Projekt **Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen** [10a] die zuvor erkannten Schwachstellen aufgesucht, analysiert und Wege aufgezeigt werden, um sie zu eliminieren. Die Anlagen werden in drei Teilbereiche aufgeteilt: Wärmequelle, Wärmepumpe und Wärmeabgabesystem inklusive Speicher. Die Wärmequellensysteme sind Abwasser, Kühlwasser oder Erdsondefelder. Neben der energetischen Effizienz ist auch die Kostenstruktur der Anlagen von Interesse. Die besten Anlagen sollen dokumentiert werden, und mit Kennzahlen sollen Vergleiche mit anderen Anlagen einfacher möglich werden. Im Projekt **Beurteilungstool für Grosswärmepumpen – Phase 2** [10b] ergänzt das BFE ein von der Stadt Zürich und dem Elektrizitätswerk der Stadt Zürich ewz finanziertes Vorhaben, in welchem ein Beurteilungstool für Grosswärmepumpen konzipiert wurde. Das Ziel des Tools liegt darin, schnell und einfach die relevanten Aspekte grösserer Wärmepumpen-Projekte zu erkennen und sie auf die künftige Effizienz und damit Förderwürdigkeit zu beurteilen. Das Tool soll nun an einigen Anlagen validiert werden. Diese Phase 2 wird vom Kanton Zürich, der Stadt Zürich und vom Kanton Basel-Stadt mitfinanziert. Es soll später im Rahmen des Verbundes der 10 grössten Schweizer Städte und auch via Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS verbreitet werden.

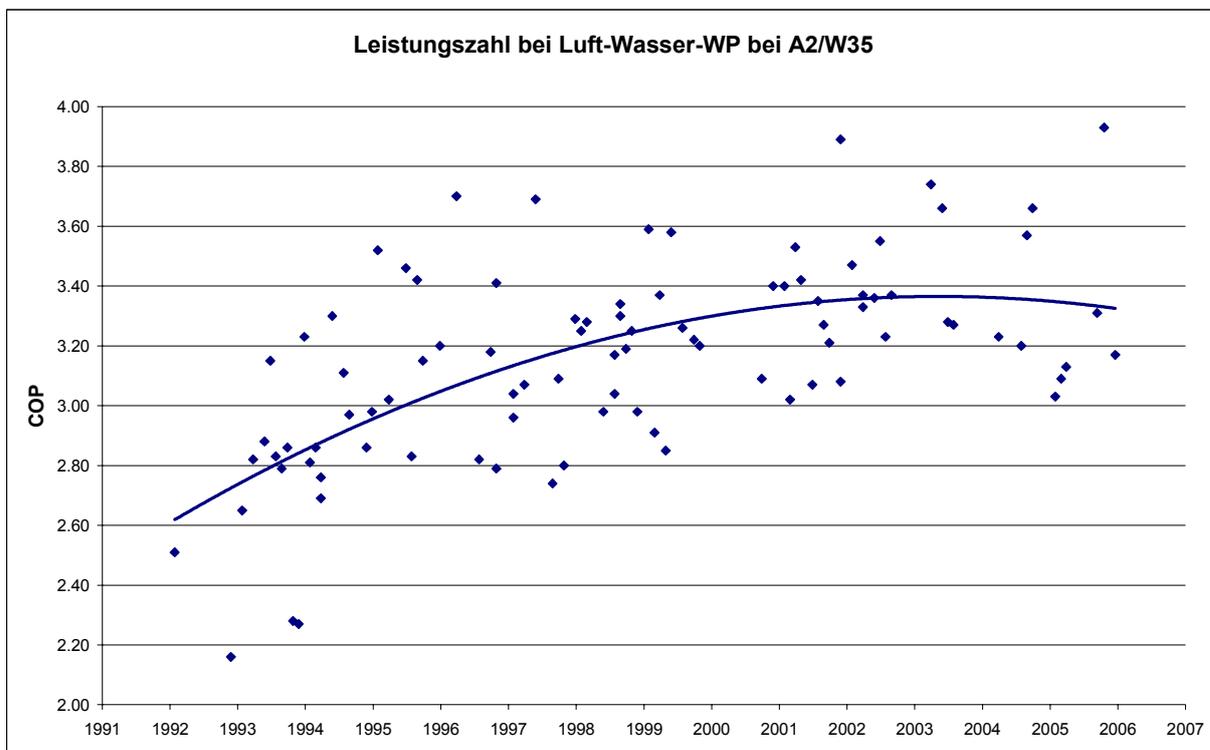
Das langjährige Projekt **Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996 – 2003** [27]

untersuchte Kleinwärmepumpenanlagen im konkreten Einsatz in den Gebäuden. Das Ziel war unter anderem das Langzeitverhalten, aber auch die Klärung der Frage ob die Wirkungsgrade im Feld den im Prüfbetrieb gemessenen Wirkungsgraden entsprechen. Die Prüftätigkeit am Wärmepumpen-Testzentrum an der Interstaatlichen Fachhochschule in Buchs SG wurde fortgesetzt und zusammenfassend im Bericht **Qualitätsprüfung von Kleinwärmepumpen mittels Norm- und Feldmessungen; Teilprojekt Effizienzsteigerung (Bestanlagen)** [11] veröffentlicht (Figur 2). Leider wurde in der Prüftätigkeit des letzten Jahres festgestellt, dass 5 von 6 Luft/Wasser-Wärmepumpen kleinere Wirkungsgrade aufwiesen als die Durchschnittswerte des Vorjahres. Bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen waren die Wirkungsgrade etwa gleich wie im Vorjahr. Diese Entwicklung ist bedauerlich, sie ist eine Konsequenz des Verhaltens der Hersteller, die eine erhöhte Akzeptanz von Wärmepumpen im Markt «natürlich» auch über den Preis erreichen wollen. Aus Herstellerkreisen wurde aber angekündigt, dass in den kommenden Jahren wieder eine Wettbewerbspositionierung durch verbesserte Wirkungsgrade zu erwarten sei. Im Projekt wurden auch die Anlagen mit den besten Wirkungsgraden des FAWA-Projektes weiter im Feldeinsatz verfolgt. Das Projekt **QS-WP/QP: Qualitätsprüfung von Klein-Wärmepumpen mittels Norm- und Feldmessungen, Teilprojekt Langzeitverhalten**

2007 – 2008 [10c] verfolgt die Leistung dieser Bestanlagen. Damit werden das Langzeitverhalten der Jahresarbeitszahl (Alterung) und die Wartungs- und Reparaturkosten in Abhängigkeit vom Alter der Maschine untersucht. Aus den bisherigen Untersuchungen über die letzten 12 bis 13 Jahren geht hervor, dass kein Leistungsabfall und auch kein Nachlassen der Effizienz festgestellt werden kann.

Wärmepumpen können mit elektrischer Energie angetrieben werden, aber auch thermische beziehungsweise chemische Energie kann die Antriebsenergie liefern. Im Projekt **Qualitätssicherung von Gaswärmepumpen GWP** [12a,b] unterstützte das BFE Bestrebungen des SVGW (Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches), Qualitätsstandards für gasbetriebene Wärmepumpen zu definieren. Gasbetriebene Wärmepumpen funktionieren entweder über das Absorptions-Wärmepumpen-Prinzip, wo eine Wärmemenge höherer Temperatur als Antriebsenergie dient oder über das Kompressions-Wärmepumpen-Prinzip, wo ein mit Gas betriebener Motor den Kompressor der Wärmepumpe antreibt. Aus den Arbeiten entstand das Prüfreglement für gasbetriebene Wärmepumpen, das Anfang 2008 von den zuständigen Verbandsstellen publiziert werden wird.

Prüfverfahren im Allgemeinen und insbesondere die Verarbeitung von punktuellen Prüfungen bei



Figur 2: Entwicklung der Leistungszahlen von Luft-Wasser-Wärmepumpen bei einer Lufttemperatur von 2 °C und einer Wassertemperatur von 35 °C. Die Effizienz verschiedener Produkte variiert stark. Der Anstieg der letzten Jahre wird nicht bei allen Produkten fortgesetzt. (Quelle: Nani et al., FHS Buchs [11])

bestimmten Umgebungsbedingungen zu saisonalen Durchschnittswerten sind ein wichtiges aber auch komplexes Thema für Anlagenvergleiche und energetische Studien. Im IEA-Projekt **Test Procedure and Seasonal Performance Factor of Residential Heat Pumps with Combined Space and Domestic Hot Water Heating** [13a] kooperieren 10 Länder. Das Projekt entstand aus einer Initiative der Schweiz, unter der operativen Leitung der Fachhochschule Nordwest-Schweiz. Der Schweizer Teil **Calculation method for the seasonal performance of heat pump compact units and validation** [14] untersuchte wie der Jahresnutzungsgrad aus Prüfstandsmessungen in Kompakt-Wärmepumpen berechnet werden kann. Die Methode wurde an zwei Feldanlagen erfolgreich getestet. Dank dieser Referenz wurde auch für das IEA-Projekt **Economical Heating and Cooling Systems for Low-Energy Houses** [13b] die Fachhochschule Nordwestschweiz als Operating Agent bestimmt. Beteiligt sind die Länder Österreich, Kanada, Deutschland, Japan, Niederlande, Norwegen, Schweden, USA und die Schweiz. Die Schweiz konzentriert sich auf das Projekt **SEK – Standardlösungen zum energieeffizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen** [15] und kann damit auch auf die Vorarbeiten des STASCH-Projektes [25] zurückgreifen. Obwohl Kühlen auch als verzichtbarer Luxus angesehen werden kann, wird es doch aufgrund moderner Architektur oder auch aufgrund erhöhter Komfort-Ansprüchen vom Markt verlangt. Das BFE möchte alle Trends und Entwicklungen so energieeffizient wie möglich gestalten und engagiert sich dementsprechend auch für die Anwendung Kühlen mit Wärmepumpen. Aus dem Projekt können Definitionen von Standardsystemen zum Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen für unterschiedliche Anwendungen, auch MINERGIE®- und MINERGIE-P®-Gebäude, erwartet werden. Die Schaltungen werden mit Simulationsrechnungen und mit Feldmessungen dokumentiert. Das Projektergebnis wird die grundlegenden Fragen energetische Effizienz, erreichbarer Komfort, Einsatzgrenzen, Einfluss des Klimas, Robustheit der hydraulischen Schaltung, Regelung und Investitionen beantworten.

Die Schweiz engagiert sich auch im internationalen Normenwesen. Im Projekt **Vertretung im CEN und Vorsitz der Working Group 10** [16] wird die bestehende Europäische Norm EN 255-3 beraten und ein Vorschlag zur Überarbeitung erstellt. Die Norm beschreibt die Prüfung von Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Erwärmung von Brauchwasser.

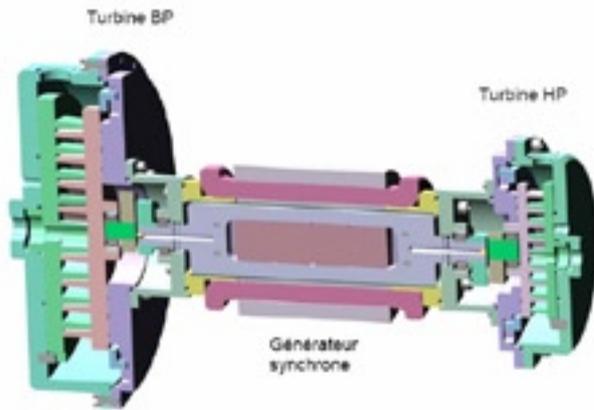
WÄRME – KRAFT – KOPPLUNG

Dezentrale Wärme-Kraft-Kopplung (WKK)-Anlagen können mit gleichem Verbrauch von fossilen Brennstoffen wie bisher neben Nutzwärme noch

einen beträchtlichen Anteil an elektrischer Energie erzeugen. Die Anlagen sollen aber aus betriebswirtschaftlichen Gründen Leistungen von mehreren Hundert Kilowatt betragen. Dadurch müssen WKK-Anlagen dort platziert werden, wo auch ein entsprechendes Wärmeabnahme-Potential vorhanden ist. In grösseren Ueberbauungen oder in industriellem Umfeld ist das der Fall. Sollen WKK-Anlagen aber in dünn besiedelten Regionen oder in Siedlungen mit Ein- und kleineren Mehrfamilienhäusern eingesetzt werden, benötigt die Technologie kleine Nahverbundsnetze und damit als Voraussetzung Absprachen und Vereinbarungen von mehreren Grundeigentümern. Es hat sich gezeigt, dass vor allem dieses eher psychologische Problem einen gravierenden Einfluss auf die bis heute geringe Verbreitung von WKK-Anlagen hat. Im Berichtsjahr wurde auf diesem Gebiet kein Forschungsprojekt bearbeitet.

In industriellen Betrieben stehen häufig Abwärmen von relativ geringen Temperaturen zwischen etwa 100 bis 250 °C zur Verfügung. Diese Abwärmen können durch Stirling- oder ORC-Konzepte (ORC = *Organic Rankine Cycle*) in höherwertige Wellenenergie oder in Elektrizität und nutzbare Abwärme umgewandelt werden. Ein ORC-Prozess ist gleich aufgebaut wie ein Dampfkraftwerk mit dem Unterschied, dass das Kreislaufmedium nicht Wasser, sondern ein organisches Arbeitsmedium ist. Momentan kann in Deutschland eine erhöhte Aktivität mit ORC-Konzepten beobachtet werden, auch ORC-Anlagen mit Ammoniak sind im Stadium des Feldtests. Die kritischsten Komponenten dieser Kreisläufe ist die Expansionsmaschine. Das Projekt **Nouveau système de cogénération à turbine spirale haute température** [17] entwickelt einen ORC-Kreislauf mit einer zweistufigen Expansionsmaschine, die auf dem Scroll-Prinzip basiert (Figur 3). Leider konnte kein handelsüblicher Scroll-Kompressor gefunden werden, der als Expansionsmaschine betrieben werden könnte. Somit war das Projektteam gezwungen, eine Neuentwicklung der SCROLL-Expansionsmaschine anzugehen. Die Maschine soll hermetisch und drehzahlvariabel sein und verschiedene Arbeitsmedien, insbesondere natürliche, zulassen. Das Vorhaben ist technologisch anspruchsvoll, sodass die Prototypen-Fertigung und die Erfassung der Leistungsfähigkeit erst im Jahr 2008 erfolgen kann. Zu diesem Zweck wurde eine Test-Installation geplant und aufgebaut.

WKK-Anlagen bestehen häufig aus BHKW (Block-Heiz-Kraftwerken), die technisch gesehen aus einem Verbrennungsmotor und einem direkt angeflanschten Generator bestehen. Deshalb muss der Motor auch auf der auf die Netzfrequenz abgestimmten Drehzahl arbeiten. Die Abgase haben direkt nach dem Motor eine Temperatur von ca 400 bis 650 °C und enthalten damit erhebliche thermische Energie. Abwärmennutzungen werden



Figur 3: Expansionsmaschine einer ORC-Anlage auf der Basis von zwei Scroll-Expandern auf einer Welle (Turbine BP = Niederdruckturbine, Turbine HP = Hochdruckturbine). Damit lässt sich eine zweistufige Expansion des Arbeitsmediums erreichen. (Quelle: Kane et al., ENEFTECH SA und EPFL [17])

schon häufig eingebaut, die vor allem Warm- und Heizungswasser erzeugen. Das Projekt **Energetische Optimierung von Biogas-BHKW, Phase 1: Potentiale und Wirkungsgradsteigerung Biogasmotor, NO_x-Reduktion, Stromgewinnung aus Abwärme** [18] hat als Hauptziel, technische Wege aufzuzeigen wie aus der thermischen Energie in der Abwärme des Biogas-Motors zusätzliche hochwertige Energie in Form von Elektrizität produziert werden kann. Die reine Elektrizitätsproduktion durch BHKW-Anlagen ist in der Schweiz in der Verstromung von Biogas aus Gülle und Kläranlagen stark verbreitet, da an den Standorten die Abwärme häufig nicht sinnvoll genutzt werden kann. Der Vergleich der Potentiale, aber auch der zu erwartenden Kosten der verschiedenen Möglichkeiten (Stirling, ORC, Zusatzturbine, Sekundärdampfkreislauf, Thermoelektrizität) wird die Basis für eine mögliche Phase 2 legen, in der dann die meistversprechendsten Varianten experimentell untersucht werden sollen.

KÄLTE

Da auch in einer Kältemaschine die gleichen apparativen Elemente vorhanden sind, wie in einer Wärmepumpe, sind in beiden Anwendungsfällen ähnliche Problemkreise zu lösen. Die Suche nach effizienter Kältetechnik wird auch deshalb vom BFE unterstützt, weil der Markt für Kälteanlagen um ein Vielfaches grösser ist als der Markt für

Wärmepumpen und damit Energieeinsparungen in Kälteanlagen einen höheren Einfluss auf die Gesamtenergiesituation der Schweiz haben. Die meisten Kälteanlagen, die in der Schweiz projektiert und gebaut werden, haben aber einen hohen Grad an Individualität und werden meistens als einzelne Projekte bearbeitet. Nur im sehr kleinen Leistungsbereich, wie zum Beispiel in der Klimatisierung von Einzelzimmern oder kleinen Gebäuden oder in der Haushaltkälte, die allerdings einen grossen internationalen Markt darstellt, werden Seriengeräte eingesetzt. Auch in der Kälteindustrie ist nun ein beginnender Trend zu natürlichen Kältemitteln zu beobachten. Von verschiedenen renommierten Kältetechnik-Firmen wurden Kälteanlagen mit dem Arbeitsmedium Propan gebaut und zur Zufriedenheit der Kunden in Betrieb genommen.

Das Projekt **Wärmerückgewinnung (WRG) in der gewerblichen Kälte** [19] untersucht den energetischen Nutzen einer Wärmerückgewinnung der Abwärme aus den Kondensatoren und soll die im Moment aus der Branche vorgebrachten Einwände gegen die Wärmerückgewinnung klären. Es wird argumentiert, dass die WRG durch die Anhebung der Kondensationstemperatur die Arbeitszahl der Kälteanlage unwirtschaftlich verschlechtert. Da jedoch bei vielen Anlagen während einer längeren Zeit im Jahr ein paralleler Kälte- und Wärmebedarf besteht, könnte die gesamte Energiebilanz verbessert werden. Der Sachverhalt wird an zwei konkreten Anlagen (*Migros* und *Coop*) messtechnisch aufgezeigt. Das Mess-System an der einen kommerziellen Kälte-Anlage läuft nach längeren Startschwierigkeiten nun gut, bei der anderen Anlage mussten Durchflussmesser nun doch in die Anlage fix eingebaut werden, da die Resultate der zuerst vorgesehenen Ultraschall-Durchflussmesser, die von aussen an die Rohrleitungen angebaut werden können, die versprochenen Messqualitäten nicht erlangen konnten. Damit sind grosse zeitliche Verzögerungen entstanden und auch die finanziellen Beiträge mussten erhöht werden. An den Begleitgruppensitzungen, die in diesem Projekt wie in jedem anderen Projekt des Forschungsprogramms durchgeführt werden, haben sich aber alle Branchenvertreter sehr interessiert an den Resultaten geäussert, sodass das Projekt trotz der aufgekommenen Schwierigkeiten zu Ende geführt wird. Die Resultate werden danach an die Branche kommuniziert.

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 Uebernahme von erheblichen finanziellen Beiträgen. Da die Projektleiter häufig an einer Fachhochschule tätig sind, besteht eine besonders intensive Beziehung zu Fachhochschulen. Die Projekt-Themen wirken sich dabei auch auf

den Unterricht aus, denn häufig können innerhalb der Projekte auch kostengünstige Semester- und Diplomarbeiten integriert werden. Die Fachhochschulen leisten hier mit ihrer Mitarbeit auch einen kostengünstigen Beitrag zur Wissensvermehrung, denn häufig werden die Kosten für Versuchsmaterial oder Infrastruktur nicht voll auf die Projekte umgelegt. Auch die vielerorts vorhandenen Gerätepools dürfen kostengünstig, zum Teil kostenlos, für BFE-Forschungsprojekte genutzt 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. Auch mit Instituten der EPF Lausanne und der ETH Zürich besteht eine konstruktive Zusammenarbeit.

Interessierte Fachkreise werden durch Publikationen der Projektleiter und der laufenden Publikation der Ergebnisse auf der Internetseite des Programms www.waermepumpe.ch und auf der Berichtseite des BFE www.energieforschung.ch orientiert. An Workshops über abgeschlossene Forschungsprojekte werden ausgewählte Personen aus Industrie und Markt orientiert. An der diesjährigen 14. Tagung über Umgebungs-, Abwärme und Wärme-Kraft-Kopplung (UAW) wurden unter dem Titel **News aus der Wärmepumpen-Forschung: Luft-Wasser-Wärmepumpe – Magnetische Wärmepumpe – Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen** [20] im grössten Hörsaal der Fachhochschule Burgdorf die Einsatzmöglichkeiten und Detailinformationen aus abgeschlossenen und laufenden Forschungsprojekten vorgestellt und erörtert.

Mit den Verantwortlichen der Kommission für Technologie und Innovation **KTI** besteht ein reger Gedankenaustausch. Dabei wird die Förderung der verschiedenen Projekte durch die KTI und das BFE abgesprochen.

Mit dem Energieforschungsfonds der schweizerischen Gasindustrie **FOGA** (www.svgw.ch) und

dem Forschungsfonds der schweizerischen Erdölvereinigung **FEV** (www.erdoel.ch) werden gute Kontakte gepflegt. Im Berichtsjahr wurde mit dem FOGA eine Zusammenarbeit bei den Geräteprüfungen von gasbetriebenen Wärmepumpen auf Basis von Absorptions- und Verbrennungsmotor-Technologie bearbeitet. Die Zusammenarbeit mit dem Forschungsfonds swisselectric-research (www.swisselectric-research.ch) wird intensiv aufgebaut. Wir erhoffen uns eine erhebliche Stärkung von Forschungsprojekten im elektrischen Energiesektor und im Gebiet der Stromversorgung. Das Projekt **Nouveau système de cogénération à turbine spirale haute température** [17] wird auch vom AXPO Naturstromfonds (www.axpo.ch) unterstützt. Der Fonds finanziert auch ein Folgeprojekt **Wärmerückgewinnung aus Abwasser**, das eine technologische Weiterführung des ehemaligen BFE-Projektes **Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen** [28] darstellt.

Das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich, die Stadt Zürich, das ewz und das Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel Stadt beteiligen sich durch namhafte Beiträge am BFE-Projekt **Beurteilungstool für Grosswärmepumpen** [10b].

Mit den Branchenverbänden besteht ein institutionalisierter Informationsfluss, denn alle wesentlichen Verbände haben ein Mitglied in der Begleitgruppe unseres Programms. Im Jahr 2008 soll die Begleitgruppe um ein Mitglied aus dem Bereich Planung erweitert werden. In der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz **FWS** arbeiten das BFE, Branchenverbände von Planern und Anbietern von Wärmepumpen, Elektrizitätswerke und Dienststellen von Kantonen zur Verbreitung zuverlässiger, effizienter und preiswerter Wärmepumpen zusammen. Die Anliegen der dezentralen Erzeugung elektrischer Energie werden durch den **WKK-Fachverband** wahrgenommen. Die Anliegen der Kältebranche werden durch den Schweizerischen Verein für Kälte **SVK** vertreten.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit erfolgte auch im Jahr 2007 vorwiegend durch eine aktive Mitarbeit im internationalen Normenwesen und im *Heat Pump Program* der Internationalen Energieagentur IEA. In einem Projekt [13b] stellt die FHNW Muttens den *Operating Agent*. Das IEA-*Heat Pump Program* ist auch zuständig für die Organisation der im dreijährigen Turnus stattfindenden **Heat Pump Conference**. Die nächste Konferenz findet vom 20. – 22. Mai 2008 in Zürich statt und wird vom *National Organizing Committee* der Schweiz vorbereitet. Auf den Aufruf des *1st announcement* sind rund 200 *abstracts* aus der

ganzen Welt eingereicht worden. Alle relevanten Informationen werden über die Konferenz-Webseite publiziert (www.hpc2008.org). In verdankenswerter Weise beteiligt sich auch die nationale und internationale Industrie in Form von Sponsoring an der Konferenz und nimmt die Gelegenheit wahr, sich einem internationalen Fachpublikum zu präsentieren.

In den wichtigen europäischen Normengremien vertritt die Schweiz ihre Anliegen. Die Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS ist Mitglied der *European Heat Pump Association* **EHPA**,

wobei der schweizerische Vertreter auch Mitglied der Begleitgruppe des Forschungsprogramms ist. Obwohl im EU-Projekt SHERPA (*Sustainable Heat and Energy Research for Heat Pump Applications*) unter Leitung der Gruppe GRETh (*Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques*) in Grenoble keine Forschungsgruppe aus der Schweiz beteiligt ist, besteht doch ein regelmässiger Gedankenaustausch mit ge-

genseitigen Besuchen mit dem Projektleiter. Die schweizerischen Aktivitäten im Bereich Ammoniak und CO₂ finden grosse Beachtung.

Die Internetseite des Forschungsprogramms www.waermepumpe.ch [29] geniesst mit über 90% der Zugriffe aus dem Ausland auch internationales Ansehen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Alle früher gestarteten P&D-Projekte wurden 2006 abgeschlossen. Die Programmleitung begrüsst aber den Entscheid des BFE sehr, wieder Projekte im Bereich P&D aufzunehmen. Es hat

sich auch in unserem Forschungsprogramm gezeigt, dass die Lücke zwischen Forschung und Markt sehr gut durch P&D-Projekte geschlossen werden kann.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Im Jahr 2007 wurden weiterhin die im CORE-Konzept aufgelisteten Ziele beharrlich verfolgt. Dabei wurden einige neue Forschungsarbeiten lanciert, die langfristige Ziele verfolgen. Hier dürfen besonders die Arbeiten an der magnetischen Wärmepumpe und die Optimierung der Luft/Wasser-Wärmepumpe genannt werden. Nach Abschluss des Projektes zur Suche nach Exergieverlusten wird ein Folgeprojekt für die Verbesserung von Luft-Wasser-Wärmepumpen begonnen, das eine konsequente Drehzahlregelung aller Antriebssysteme als Hauptaktivität untersucht. Die Wärmepumpen-Industrie erfreut sich einer grossen Nachfrage aus dem Markt. Diese angenehme Situation führt allerdings dazu, dass viele Firmen mit der Produktion stark ausgelastet sind und neue Entwicklungen etwas zurückstellen. Hier wünschen sich die Programmleiter mehr freie Kapazität auf Seiten der Wirtschaftspartner, sodass sich die Forschung und Weiterentwicklung nicht zu stark auf die Forschungsinstitute alleine konzentrieren muss. Die vom Wärmepumpen-Testzentrum beobachtete Stagnation der Wirkungsgrade ist aus energetischer Sicht bedauerlich und kann nur durch marktwirtschaftlichen Kostendruck erklärt werden. Es konnte auch eine Internationalisierung der Wärmepumpen-Hersteller beobachtet werden. Im Berichtsjahr wurden 2 mittlere KMU, die Wärmepumpen selbst herstellten und vertrieben, von grossen internationalen Konzernen aufgekauft.

Alle Forschungsprojekte werden je nach Projektstand in den Fachmedien oder Konferenzen, an der *International Heat Pump Conference* 2008 in Zürich und auch an der nationalen UAW-Tagung 2009 präsentiert werden. Die Programmleitung ist überzeugt, dass die Erfolgsstory und die Weiterverbreitung der Wärmepumpen in der Schweiz weitergehen wird. Mit zunehmenden Preisen der fossilen Energieträger und oder mit einer konsequenten Durchsetzung der Möglichkeiten zur CO₂-Reduktion wird auch die Verbreitung der dezentralen WKK-Anlagen grösser werden.

Das Programm P+D bildet das Bindeglied zwischen der Forschung einerseits und dem Markt andererseits. Mit diesem Programm wird es wiederum möglich, interessante Ideen im Feld zum Durchbruch zu verhelfen und erfolgreiche Pilotanlagen einem weiteren Publikum bekannt zu machen und zur Nachahmung zu empfehlen. Das Programm P+D ist gerade für die im Allgemeinen klein strukturierte Wärmepumpenbranche der Schweiz eine grundlegende Unterstützung, um neue Ideen überhaupt realisieren und finanziell verkraften zu können.

Die ausgeführten und unterstützten Projekte gaben und sind auch einen Fundus für weiterführende Arbeiten ab. Dank Pilotanlagen konnten z.B. grundlegende Planungsprobleme im Feld erkannt und in weiteren Projekten aufgearbeitet werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 vorhanden (siehe www.waermepumpe.ch)

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer)

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

- [1] P.W. Egolf, A. Kitanovski, D. Vuarnoz, M. Diebold, C. Gonin (Peter.egolf@heig-vd.ch), Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-Bains: **Magnetische Wärmepumpe mit Erdwärme-Quelle: Optimierter Prototyp** (JB).
- [2] B. Wellig, A. Grüniger, R. Röthlin (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw: **CO₂-Erdwärme-sonde, Phase 2** (JB).
- [3] K. Hilfiker, L. Gasser, B. Wellig (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw: **WEXA: Exergie-Analyse im Dienste der Verbesserung von Luft-Wasser-Wärmepumpen** (SB Projekt 101'543).
- [4] L. Berlinger, M. Imholz, M. Albert, B. Wellig, K. Hilfiker (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw: **LOREF Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung: Optimierung des Lamellenluftkühlers / Verdampfers von Luft-Wasser-Wärmepumpen Teil 1: Theoretische und experimentelle Untersuchungen** (SB Projekt 100'059).
- [5] R. Sahinagic, L. Gasser, B. Wellig, K. Hilfiker (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 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** (SB Projekt 100'059).
- [6] P. Hubacher, M. Ehrbar (he-ko@bluewin.ch), Hubacher Engineering, Engelburg: **Witterungsgeführter Laderegler** (JB).
- [7] H.R. Gabathuler, H. Mayer, Th. Baumgartner (gabathuler.ag@bluewin.ch), Gabathuler AG, Diessenhofen: a) **Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe – Messungen an einer Anlage in Rorschacherberg** (SB Projekt 101'494) • b) **Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe und sekundärseitiger Laderegelung – Messungen an einer Wärmepumpenanlage in Uttwil TG** (JB).
- [8] J. Marti, A. Witzig, T. Brüllmann (joerg.marti@velasolaris.com), Vela Solaris AG, Rapperswil: **Simulation von Wärmepumpen-Systemen in Polysun 4** (JB).
- [9] S. Citherlet, J. Bony, B. Nguyen (stephane.citherlet@heig-vd.ch), Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-Bains: **SOL-PAC Analyse des performances du couplage d'une pompe à chaleurs avec une installation solaire thermique pour la rénovation** (JB).
- [10] P. Hubacher, M. Ehrbar (he-ko@bluewin.ch), Hubacher Engineering, Engelburg: a) **Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen** (JB) • b) **Beurteilungstool für Grosswärmepumpen, Phase 2** (JB) • c) **QS-WP/QP: Qualitätsprüfung von Klein-Wärmepumpen mittels Norm- und Feldmessungen – Teilprojekt Langzeitverhalten 2007 – 2008** (JB).
- [11] M. Nani, P. Hubacher (marco.nani@ntb.ch), Interstaatliche Hochschule für Technik NTB, Buchs: **Qualitätsprüfung von Klein-Wärmepumpen mittels Norm- und ausgewählten Feldmessungen – Effizienzsteigerung (Bestanlagen) und Langzeitverhalten** (SB Projekt 100'991).
- [12] SVGW Autorenkollektiv (j.fernandez@svgw.ch), Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW – Prüf- und Zertifizierungsstelle Gas, Schwerzenbach: a) **CH Prüfreglement – Prüfung von Luft/Wasser-Gaswärmepumpen** (SB Projekt 101'604) • b) **CH Prüfreglement – Prüfung von Wasser/Wasser-Gaswärmepumpen und Sole/Wasser-Gaswärmepumpen** (SB Projekt 101'604).
- [13] C. Wemhöner, Th. Afjei (carsten.wemhoeener@fnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz: a) **IEA HPP Annex 28 Prüfmethode und Berechnungsverfahren für den Jahresnutzungsgrad von kombiniert arbeitenden Wärmepumpensystemen für Heizung und Warmwasser** (Zusammenfassung IEA HPP Annex 28 SB Projekt 100'060) • b) **Operating Agent IEA HPP Annex 32 Economical Heating and Cooling for Low Energy Houses** (JB).
- [14] C. Wemhöner, R. Dott, Th. Afjei, H. Huber, D. Helfenfinger, P. Keller, R. Furter (thomas.afjei@fnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz: **Calculation method for the seasonal performance of heat pump compact units and validation** (SB Projekt 100'238).
- [15] R. Dott, C. Wemhöner, Th. Afjei (thomas.afjei@fnw.ch), Fachhochschule Nordwest-Schweiz, Institut Energie am Bau, Muttenz: **SEK – Standardlösungen zum energie-effizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen** (JB).
- [16] M. Nani (marco.nani@ntb.ch), Interstaatliche Fachhochschule Buchs, Buchs: **Vertretung BFE im CEN und Vorsitz der WG10** (JB).
- [17] M. Kane, D. Cretigny, D. Favrat (malick.kane@eneftec.com), ENEFTECH Innovation SA, Lausanne: **Projet HT SCROLL: Nouveau système de cogénération à turbine spirale haute température** (JB).
- [18] P. Soltic, Chr. Bach (christian.bach@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Energetische Optimierung von Biogas-BHKW, Phase 1: Potentiale und Wirkungsgradsteigerung Biogasmotor, NO_x-Reduktion, Stromgewinnung aus Abwärme** (gestartet Ende Dezember 2007).
- [19] M. Erb, St. Gutzwiller (markus.erb@eicher-pauli.ch), Dr.Eicher+Pauli AG, Liestal: **Wärmerückgewinnung (WRG) in der gewerblichen Kälte** (JB).
- [20] Th. Kopp, F. Rognon (tkopp@hsr.ch), Bundesamt für Energie, Bern: **Tagungsband der 14. Tagung des Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte: News aus der Wärmepumpenforschung Luft-Wasser-Wärmepumpe – Magnetische Wärmepumpe – Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen** (SB auf www.waermepumpe.ch)

Referenzen

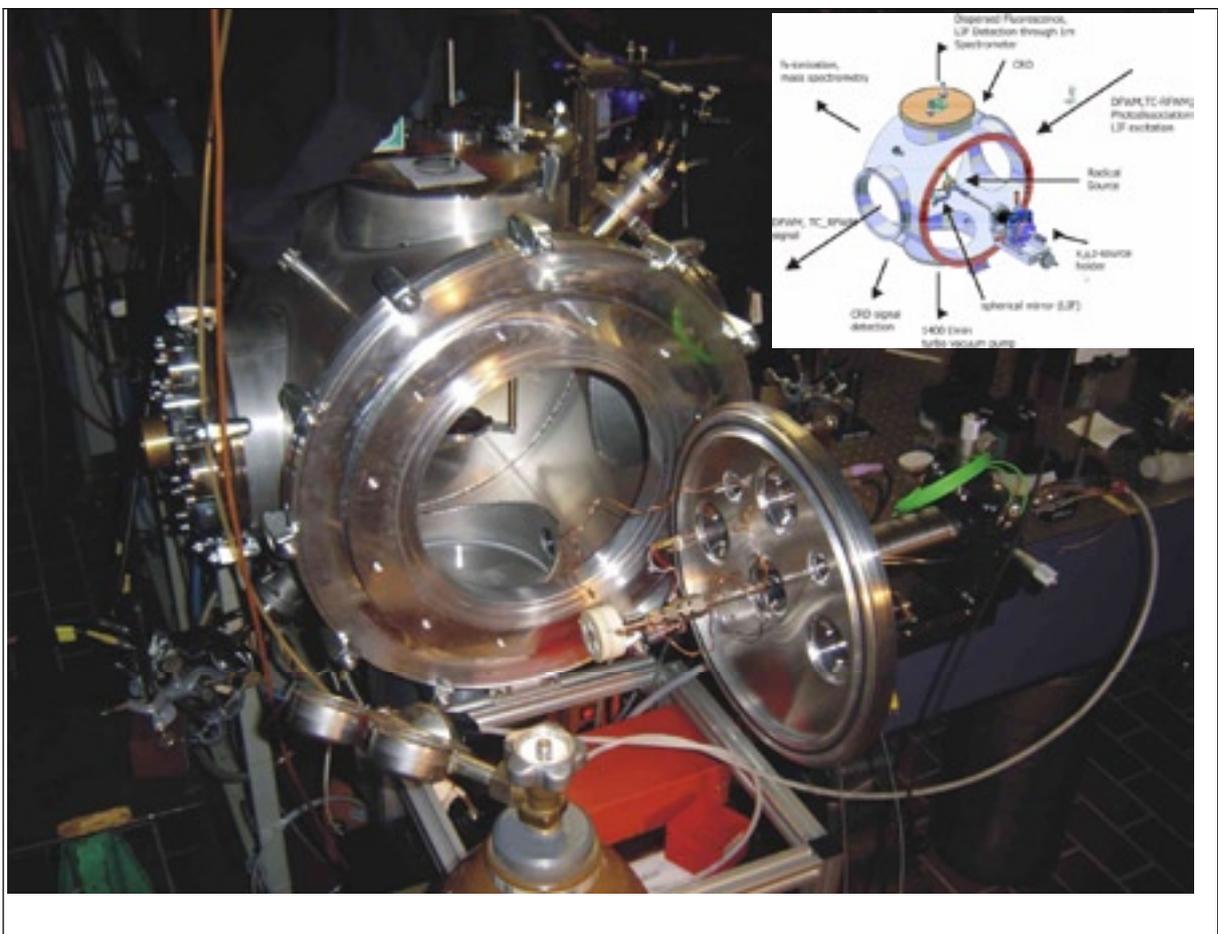
- [21] Bundesamt für Energie BFE: **Gesamtenergiestatistik 2006**, Bern, 2007
- [22] CORE: **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007**, Bern, 2003
- [23] Eidgenössische Energieforschungskommission CORE: **Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 – 2011**, Bern, 2007
- [24] P.W. Egolf, F. Genre, A. Kitanovski, O. Sari (Peter.egolf@heig-vd.ch), Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-Bains: **Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpe: Anwendungen in der Schweiz** (SB Projekt 100'873).
- [25] Th. Afjei, H.R. Gabathuler, H. Mayer (thomas.afjei@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz: **Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen** (SB Projekt 39'172).
- [26] P. Hubacher, M. Ehrbar (he-ko@bluewin.ch), Hubacher Engineering AG und Enertec AG, Engelburg und Sargans: **Grosswärmepumpen: energetische und planerische Analyse von 10 Anlagen – Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte** (SB Projekt 100'237).
- [27] M. Erb, P. Hubacher, M. Ehrbar (markus.erb@eicher-pauli.ch), Dr.Eicher+Pauli AG, Liestal: **Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996 – 2003** (SB Projekt 100'064).
- [28] O. Wanner (oskar.wanner@eawag.ch), EAWAG aquatic research, Dübendorf: **Wärmerückgewinnung aus Abwasser** (SB Projekt 44'177).
- [29] Bundesamt für Energie BFE: **Internetseite des Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte** (www.waermepumpe.ch), Rubrik Berichte: download von Zusammenfassungen, Jahresberichten und ausführlichen Schlussberichten von ausgeführten Forschungsarbeiten.

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

FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Stephan Renz

renz.btr@swissonline.ch



Untersuchungen im Molekularstrahl im Vakuum

Zur Untersuchung von Peroxy Radikalen im Zündvorgang wurde im 2007 auf einem neu errichteten Versuchstand an der Swiss Light Source (SLS)-Beamline des Paul Scherrer Instituts in Villigen eine Interaktionskammer aufgebaut.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die in den letzten Jahren erfolgte und gegen Ende 2007 noch akzentuierte Erhöhung der Preise für fossile Energieträger hat Auswirkungen auf die Verfügbarkeit und die Auswahl an Brenn- und Treibstoffen für Verbrennungssysteme. Die Investitionen in neue und zu erneuernde Förderanlagen für Erdgas und Erdöl werden wiederum rentabel. Zudem können Ressourcen erschlossen werden, die bisher nicht wirtschaftlich verwertbar waren. Zu den gemäss Bericht der Internationalen Energieagentur bisher verbrauchten Erdölvorkommen kommt die rund vierfache Menge hinzu, die nun kostendeckend gewonnen werden kann. Die Gewinnung anderer fossiler Energieträger wie Kohle wird konkurrenzfähig. Energieträger auf der Basis von Biomasse, die durch Verbrennung in Nutzenergie umwandelbar sind, werden wettbewerbsfähig. Die hohen Energiepreise stellen zudem neue Anforderungen an die Effizienz der Energieumwandlungssysteme und erlauben dafür einen höheren Aufwand zu treiben.

Auf der anderen Seite wird die Verbrennungsforschung von aktuellen umweltrelevanten Themen wie Klimawechsel durch CO₂ Emissionen und Gesundheitsbeeinträchtigung durch Feinstaubemissionen beeinflusst. Hinzu kommt ein weltweit stark zunehmender Energieverbrauch und damit Ressourcenverzehr dem von verschiedener Seite Einhalt geboten werden soll.

Das Thema der Verbrennungsforschung wird im Vergleich zu den Vorjahren vor neue Herausforderungen gestellt. Die bisher ökonomisch weniger relevante Effizienzverbesserung wird aus wirtschaftlichen Gründen zwingend. Hinzu kommt die Forderung an die Reduktion des CO₂-Ausstosses und die Vermeidung weiterer umwelt- und gesundheitsgefährdender Stoffe. Die international vielerorts geförderten Projekte für die Elimination des CO₂ aus der Nutzung fossiler Energieträger führen zu neuen Herausforderungen für die Verbrennungssysteme und bringen andere Brennstoffe hervor. Neben fossilen Energieträgern werden künftig synthetische Brennstoffe, Biomasse und Wasserstoff an Bedeutung gewinnen. Verbrennungssysteme müssen für die effiziente und schadstoffarme Nutzung solcher Brennstoffe nicht nur angepasst sondern auch optimiert werden.

Die Nutzung fossiler Energieträger durch Verbrennung hat unsere Energieversorgung in der Vergangenheit dominiert und wird auch in Zukunft weltweit massgebend bleiben. Eine weitere Verbesserung der bereits auf hohem Niveau stehenden Verbrennungssysteme ist somit weiterhin gefordert.

Die Schweizer Verbrennungsforschung ist international anerkannt. Der Bund setzt dafür jährlich 11 Mio. CHF ein. Hinzu kommen die Forschungsgelder der in der Schweiz aktiven Motorenher-

steller, Zulieferer, der Verbrennungsindustrie und Entwicklungszenter mit rund 5'000 Mitarbeitern und einem Jahres-Umsatz von ca. 2 Mia. CHF. Durch die vorgenannten geänderten Rahmenbedingungen entstehen auch neue Chancen für die Schweizer Industrie und Forschungsinstitutionen. Um im weltweiten Forschungsumfeld einen Beitrag leisten zu können, sind eine Konzentration und die Kontinuität in ausgewählten Themen erforderlich. In der Umsetzung des Forschungsprogramms Verbrennung wird diesem Umstand Rechnung getragen.

Die Ausrichtung des Programms Verbrennung richtet sich nach den Vorgaben des **Konzeptes der Energieforschung des Bundes** [14], das für die Periode 2008 – 2011 neu festgelegt wurde. Die technischen und ökonomischen Ziele sind:

- Reduktion des spezifischen CO₂ Ausstosses;
- Erhöhung des (System-)Wirkungsgrades zur Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs (Ressourcenschonung, Ökonomie);
- Fähigkeit, verschiedene Energieträger und vor allem auch biogene Energieträger zu nutzen;
- Reduktion der Schadstoffemissionen (u.a. Feinstaub) zur Erfüllung der zunehmend schärferen Vorschriften;
- Verbesserung der Konkurrenzfähigkeit von Verbrennungssystemen für biogene Energieträger.

Daraus leiten sich folgende Schwerpunkte ab:

- Darstellung von «Null-Emissions-Systemen» für die kleinskalige (10 kW bis 100 kW) kombinierte Strom-Wärme-Kälte-Erzeugung (inkl. Wärmepumpe und Biomasse);
- Integration der Erkenntnisse aus Grundlagenexperimenten (Laserdiagnostik) in die Entwicklung miniaturisierter, nicht-invasiver Sensoren für den operationellen Einsatz in Verbrennungsmaschinen;
- Optimierung der Gemischaufbereitung und Verbrennung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim (Teil-)Einsatz von biogenen Kraftstoffen;
- Umsetzung von Grundlagenkenntnissen für die Darstellung von Technologien zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften (EURO 6, USA 2010/14) mit Schwerpunkt mittlerer und grösserer Dieselmotoren;
- Entwicklung robuster Modelle (Schwerpunkt *Computational Reactive Fluid Dynamics CRFD*) für den Einsatz in der Entwicklung, Optimierung und Diagnose von neuen Verbrennungssystemen, von verbesserungsbedürftigen Grundlagen bis hin zu Anwendungen;
- Stärkere Vernetzung der experimentellen und numerischen Methoden für die Optimierung des Gesamtsystems Motor-Abgas-Nachbehandlung.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

Die Verbrennungsforschung ist in der Schweiz recht stark. Sie ist schwergewichtig lokalisiert an der ETHZ und am PSI. Im folgenden sind nur wenige Projekte herausgegriffen. Weitere Beschreibungen sind in den Jahresberichten des PSI und der entsprechenden ETH-Institute zu finden.

NUMERISCHE SIMULATION, MESSMETHODEN UND VERSUCHSTRÄGER

Um Fortschritte in der Verbrennungsforschung zu erzielen und die sich technisch konkurrenzierenden Aufgaben Wirkungsgraderhöhung und Schadstoffreduktion zu beherrschen, ist ein laufend verbessertes Verständnis für die Vorgänge und Einflussfaktoren der Verbrennung als chemischer, thermodynamischer aber auch kinetischer Prozess erforderlich. Rein empirisches Vorgehen bringt nur zufällige Ergebnisse. Wichtige Instrumente sind computergestützte Berechnungsmodelle (Modellierung), optische Messverfahren (Laserspektroskopie) sowie geeignete Versuchsträger, um die theoretischen Ergebnisse zu überprüfen oder die erforderlichen Kennzahlen zu liefern.

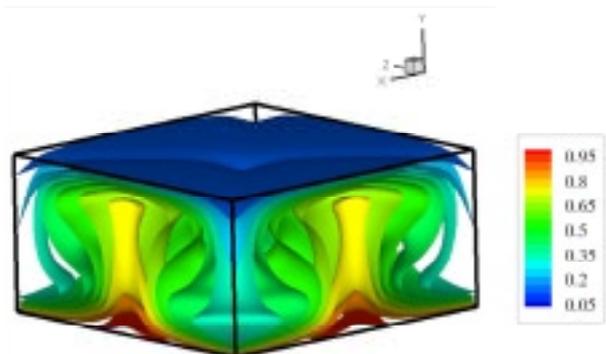
Im abgeschlossenen Projekt **Lattice Boltzmann Simulationsmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich** [1] wurde am Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV) der ETH Zürich eine neue Annäherung für die rechenunterstützte Strömungsdynamik an einer Mikrometerskala entwickelt. Diese Annäherung basiert auf den sogenannten Boltzmann Gitter-Modellen (Lattice Boltzmann Method) der Boltzmann-kinetischen Gleichung. Als Ergebnisse des Projektes sind folgende Ziele erreicht worden:

1. Die komplette Klasse von neuen und numerisch stabilen Lattice Boltzmann Modellen mit mehreren Geschwindigkeiten der Teilchen ist hergeleitet und mathematisch bewiesen.
2. Rechnerisch effiziente drei-dimensionale Modelle für isotherme Strömungen wurden entwickelt und dazugehörige effiziente parallele Computerprogramme an mehreren Problemen getestet. Diese Modelle zeigten numerische Stabilität und sind deshalb sehr wichtig für die Simulation bei höheren Reynolds-Zahlen, wie sie in turbulenten Strömungen vorherrschen. Durch die speziellen Modifikationen (zum Beispiel Outflow Randbedingungen) ist es gelungen, effiziente Simulationen in Angriff zu nehmen.
3. Ein drei-dimensionales thermisches Modell wurde weiter entwickelt und auf einigen *benchmark* Strömungen (zum Beispiel die Rayleigh-Benard Strömung) angewandt. Es ist auch gelungen die Strömungen mit erheblichen Temperatur- und Dichteschwankungen mit diesem Modell zu beschreiben (Fig. 1).

4. Das Modell für Strömungen mit mehreren Komponenten wurde entwickelt, implementiert und getestet.
5. Die neuen Modelle wurden auch zur Beschreibung von Strömungen von verdünnten Gasen angewendet.
6. Eine Methode zur Reduktion komplexer Reaktionsmechanismen wurde entwickelt und getestet für zukünftige Verbrennungsanwendungen (Fig. 2).

Theoretische Fragen sind dabei vollständig geklärt, wie die nötigen stabilen Lattice Boltzmann Modelle auf grössere Gittern und die praktischen Fragen der effektiven Anwendung. Das mikroskopisch abgeleitete thermische Modell verbessert im Wesentlichen die früheren Ergebnisse der isothermen Modelle, was unter anderem mit einer neuen Klasse der exakten Lösungen bewiesen wurde. Diese sehr effizienten Modelle ersetzen kostspielige mikroskopische Simulationstechniken wie kinetisches Monte-Carlo und/oder molekulare Dynamik für niedrige Mach-Zahl und moderate Knudsen-Zahl. Die Ergebnisse wurden in insgesamt 30 Publikationen dargestellt.

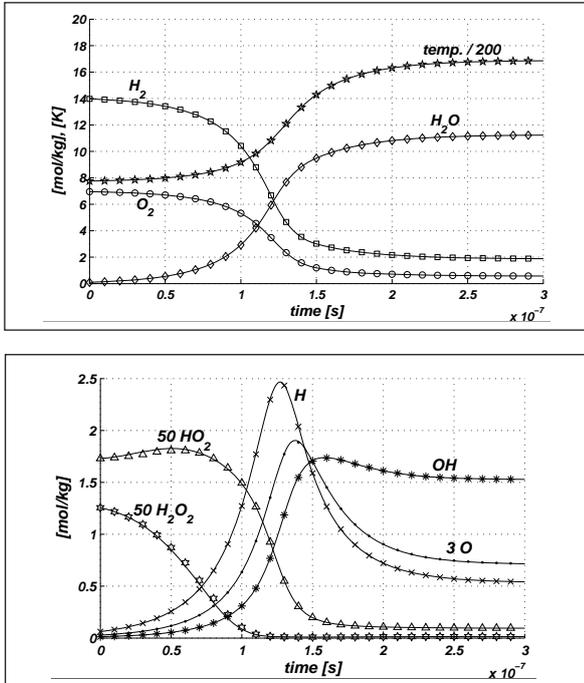
Durch diese Ergebnisse eröffnen sich neue Möglichkeiten, Strömungen in Mikrokanälen und porösen Medien effizient zu rechnen, was für zukünftige Komponenten von Energiewandlern (Reformer, Katalysatoren, Mikrobrenner, Brennstoffzellen usw.) von grosser Bedeutung ist. Die damit entstandenen neuen Simulationmöglichkeiten sind bereits weiter ausgebaut im Rahmen des CCEM-CH Projektes **CEMTEC**.



Figur 1: Gitter-Boltzmann Simulation des Temperaturfeldes bei der natürlichen Konvektion einer Flüssigkeit zwischen zwei parallelen Platten und unter dem Einfluss vom Gravitationsfeld. Der Temperaturunterschied zwischen den Platten beträgt 5 Prozent von der Referenztemperatur. Die Rayleigh-Zahl beträgt $Ra = 50'000$

Peroxy Radikale bestimmen das Zündverhalten im Verbrennungsprozess und beeinflussen die Speziation der anfänglich vorhandenen Zwischenprodukte und somit die Entwicklung wei-

terer 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. Diese Situation kann nur geändert werden, indem die Peroxy Radikale auf molekularer Ebene genau beschrieben werden.



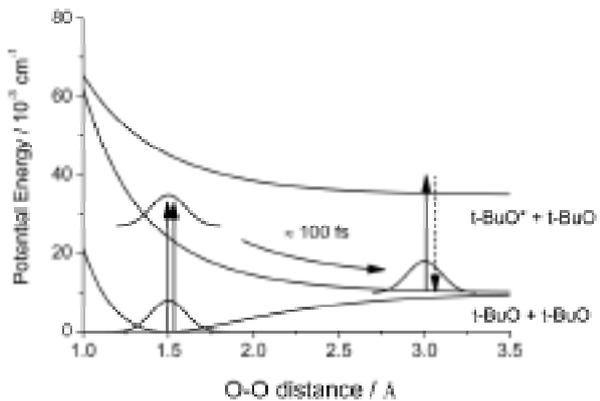
Figur 2. Vergleich von reduziertem Modell (Symbole) und detailliertem Modell (Linien) zeigt beste Übereinstimmung.

Für die Darstellung von Peroxy Radikalen wurde im nun abgeschlossenen Projekt **Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion** [2] der PSI (Paul Scherrer Institut)-Gruppe «Molekulare Dynamik» eine neue Molekularstrahl-Apparatur konstruiert und in Betrieb genommen. Eine neuartige Radikalen-Quelle wurde installiert. 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 neue Versuchseinrichtung erlaubt es, gleichzeitig lineare und nichtlineare spektroskopische Messungen an Molekülen in einem Molekularstrahl durchzuführen.

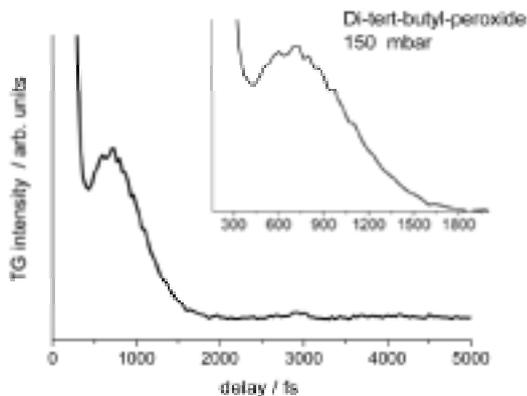
Die im Projekt zur Reife gebrachte Photo-Fragmentation-Excitation (PHOFEX) sowie die fs-Vierwellen-Methode (fs-CARS) wurden auf H₂CO und HCO angewendet. Diese Messmethoden wurden im Hinblick auf kommende Peroxyl Untersuchungen weiterentwickelt und modifiziert. Die

auf H₂CO bezogenen Arbeiten, die ihrerseits für die Beschreibung von Zündprozessen relevant sind, wurden im Rahmen von zwei Doktorandenarbeiten vom SNF (Schweizerischer National Fonds) unterstützt.

Massenspektrometrische Versuche wurden durchgeführt, um ionisierte Alkyl-Peroxy Radikale nachzuweisen. Der Nachweis konnte bisher nicht erbracht werden. Es wird vermutet, dass Peroxy-Ionen keinen stabilen Ionenzustand aufweisen. Der Beweis für diese Vermutung oder deren Gegenteil konnte noch nicht schlüssig erbracht werden. Versuche mit erweiterten spektroskopischen Methoden, die in einem Nachfolgeprojekt an der *Chemical Dynamics Beamline* am SLS-Synchrotron durchgeführt werden, sollen Klarheit schaffen. Femtosekunden-Spektroskopie wurde auf di-Tertbutyl Peroxy angewandt. Die erhaltenen Signale konnten jedoch noch nicht schlüssig interpretiert werden. Es wird mit einem grösseren Aufwand gerechnet, um die involvierten Dissoziationsprozesse zustandsspezifisch angehen zu können (Figuren 3 und 4).



Figur 3: Potentielle Energieflächen und mögliches Zerfallsschema von Di-tert-Butyl Peroxy.



Figur 4: UV-Resonanz fs-transientes Signal von Di-tert-Butyl Peroxy gemäss Zerfallsschema in Fig. 3.

Unter dem abgekürzten Titel **Peroxy** wurde im 2007 am PSI ein Nachfolgeprojekt zu [2] gestartet mit dem Ziel, mit der *Chemical Dynamics Beamline* am *Swiss Light Source* (SLS)-Synchrotron

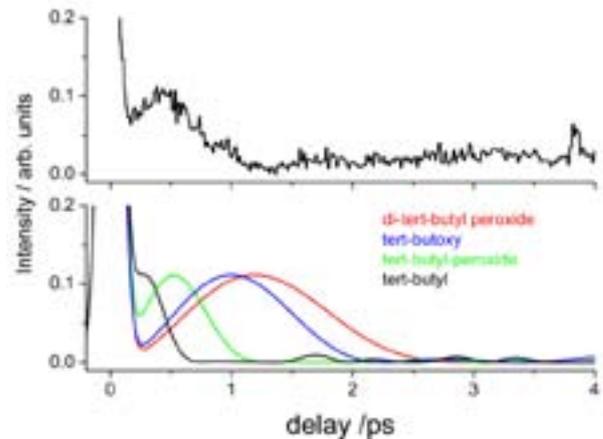
am PSI [16] eine gute spektroskopische Basis zur Erfassung der Alkyl-Peroxy Radikale zu erstellen. Peroxy Radikale bestimmen das Zündverhalten brennbarer Kohlenwasserstoffe/Luft-Gasgemische. Im Rahmen der Untersuchungen müssen unter Umständen auch die Edukte und Produkte der Peroxy Radikale vermessen werden. Dazu gehören Alkyl Radikale, Olefine, Aldehyde und Hydroperoxide.

Bis heute gibt es keine vollständigen spektroskopischen Datensätze von Peroxy-Radikalen. Um diese Lücke zu schliessen wurden aufwändige spektroskopische Messmethoden und spezielle Molekularstrahlapparaturen entwickelt, in denen die zu untersuchenden Radikale in einer gut definierten sauberen Umgebung dargestellt werden können. Im nahezu stossfreien Molekularstrahl bleiben die bei tiefen Temperaturen gebildeten Radikale stabil, bis sie gezielt mit Licht angeregt und zur Dissoziation gebracht werden können. Für diese Dissoziationsprozesse in Abhängigkeit der Anregungsenergie besteht ein besonderes Interesse, da durch sie die Bindungsenergien und damit Aktivierungsenergien und Bindungsenthalpien bestimmt werden können.

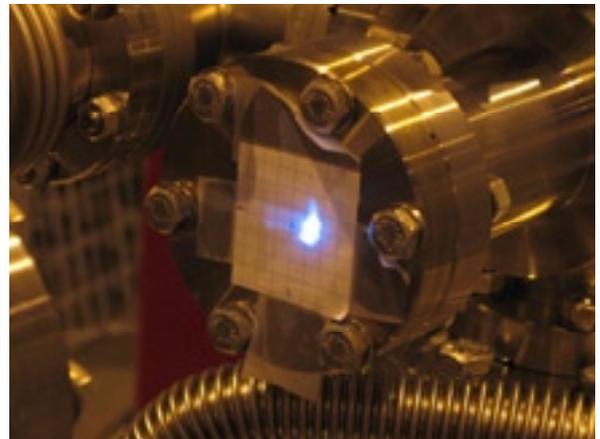
Mit Hilfe einer neuen Versuchsanlage konnten FWM (*Four wave mixing*) und CRD (*cavity ring-down*) Signale von Radikalen mit einem Signal/Rausch Verhältnis (S/N) von im Allgemeinen besser als 100 erzielt werden. Mit einer besonders sorgfältigen Justierung (Fig. 6) gelang der Nachweis von C_2 -Molekülen sogar mit einem S/N Abstand von 10^8 . Auf Grund dieser hervorragenden Empfindlichkeit konnten anschliessend auch C_2^- Anionen mit einem gut interpretierbaren Spektrum direkt nachgewiesen werden – nach unserer Kenntnis das erste Mal überhaupt. Diese demonstrierte Empfindlichkeit ist ein wesentlicher Schritt in Richtung Vermessung von Peroxy Radikalen.

Die Anwendbarkeit von dreifach resonanten fs – FWM Methoden konnte anhand von H_2CO demonstriert werden. Die Anwendung derselben Messmethode auf Di-tert-butyl Peroxy ergibt Hinweise, dass offenbar Butyl-Peroxy Radikale gebildet werden (Fig. 5). Dieses Resultat ist ein erster Einstieg in die Spektroskopie der Peroxy-Radikale.

Im EU-Projekt **HERCULES** (*High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships*) [3] werden neue Technologien in Bezug auf grosse Schiffsdieselmotoren entwickelt. Schweizer Partner sind *Wärtsilä/CH*, *ABB Turbosystems*, das LAV der ETHZ, das PSI und die 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 unterstützten und 2007 abgeschlossenen Projektteil wurde ein experimenteller Ver-



Figur 5: Vergleich von Peroxy-Messungen (obere Grafik) mit Modellberechnungen (untere Grafik) weisen darauf hin, dass Butyl-Peroxy Radikale gebildet werden (grüne Linie entspricht am besten der Messung).

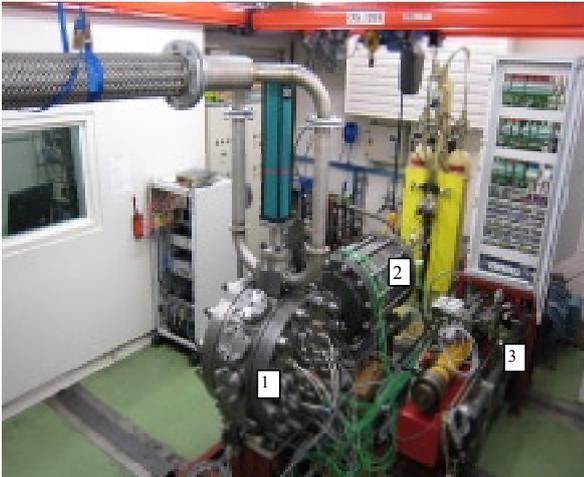


Figur 6: Justierung der Lichtquelle auf die Versuchsanpartur ist noch erforderlich.

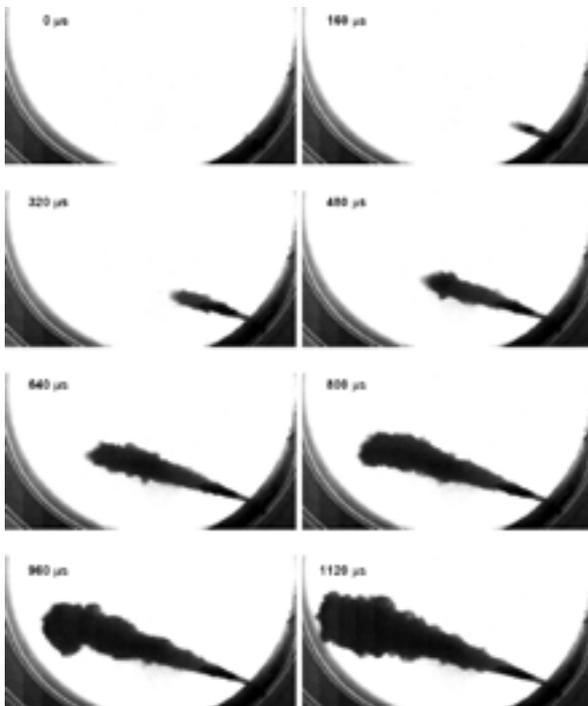
suchsträger entwickelt, der das Verbrennungssystem grosser 2-Takt-Schiffsdieselmotoren unter Berücksichtigung der charakteristischen Bedingungen weitestgehend repräsentieren soll um die benötigten Referenzdaten zu generieren.

Die Fertigstellung und die Inbetriebnahme des neuen komplexen Versuchszustandes wurden im Berichtsjahr weitgehend erreicht (Fig. 7). Zunächst wurde der Prüfstand durch die letzten noch fehlenden Elemente wie das Abgassystem oder die Stickstoff-Zufuhr vervollständigt. Zudem konnte das für die Prozessgasvorwärmung eingesetzte komplexe Aggregat durch neu entwickelte Druckverschraubungen im Hinblick auf den Netzanschluss erfolgreich modifiziert werden. Ferner konnte das hinsichtlich schiffsdieselmotorischer Verbrennung realistische Einspritzsystem vervollständigt, dessen Steuerung komplettiert, getestet und schliesslich in Betrieb genommen werden. Im Hinblick auf die Inbetriebnahme der Anlage bestand ein wesentlicher Aspekt auch in der Weiterentwicklung der relativ komplexen Steuerung, u.a. auch mit eigens entwickelten elektronischen

Komponenten. Nach der Überprüfung aller Verbindungen und Signale zwischen den Schaltschränken und den individuellen Feldgeräten konnten auch die für den Betrieb und die Datenerfassung zur Steuerung eines Messprozesses erforderlichen spezifischen Komponenten erfolgreich getestet und in Betrieb genommen werden. Schliesslich konnten dadurch erste Experimente zur Visualisierung der Einspritzung durchgeführt werden (Fig. 8).



Figur 7: Versuchstand mit Versuchszylinder (1), Prozessgasvorwärmer (2), Einspritzsystem (3).



Figur 8: Schattenbilder Einspritzung in Versuchszylinder.

Aufgrund der ersten messtechnischen Versuche bzw. der Inbetriebnahme dieses neuartigen Prüfstandes ist nun mit dem Projektabschluss ein primäres Entwicklungsziel erreicht worden. Eine Be-

stätigung der bisherigen Anstrengungen bzw. des grossen Interesses an diesem Projekt zeigt sicher auch die im Rahmen des internationalen CIMAC (*Conseil International des Machines à Combustion*)-Kongresses erhaltene Auszeichnung **2007 BP Award on Health, Safety & Environment**. In einem nächsten Schritt sollen Versuche durchgeführt werden. Ein entsprechendes Nachfolgeprojekt (**HERCULES β**) wurde innerhalb des 7. EU Rahmenprogramms (FP7) beantragt. Mit dem realisierten Versuchstand steht den Schweizer Forschungspartnern aus Industrie und Hochschule ein langfristig einsetzbares F&E-Instrument zur Erhöhung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit auf diesem Gebiet zur Verfügung.

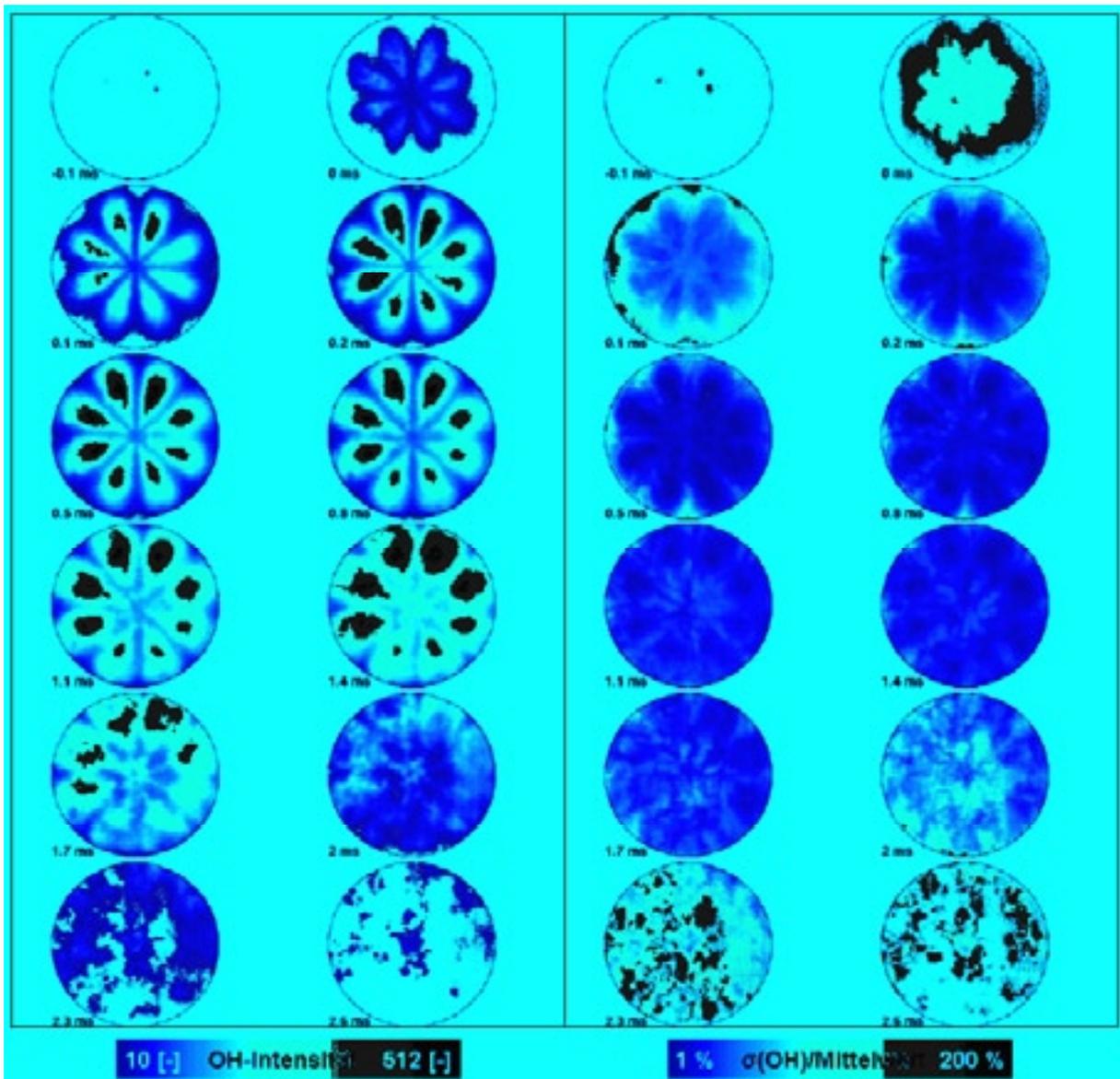
ERHÖHUNG UMWANDLUNGSEFFIZIENZ UND SCHADSTOFFREDUKTION

Die Bildung von Schadstoffen und Russpartikel hängt bei der Dieselerbrennung von Unzulänglichkeiten respektive Inhomogenitäten im Verbrennungsprozess ab. Die Bestrebungen gehen in die Richtung einer möglichst homogenen, kompressionsgezündeten Dieselerbrennung (HCCI-System: *Homogeneous Charge Compression Ignition*). Die Umsetzung dieser Anforderung über das ganze Kennfeld des Motorbetriebs d.h. im Teillast-, Vollast- und Lastwechselbereich stellt jedoch hohe Ansprüche an die Forschung und Entwicklung. Hinzu kommen die Auswirkungen der jeweiligen Anwendung des Motors, des nicht-stationären Betriebs und der gegenseitigen Beeinflussung in Mehrzylindermotoren mit unterschiedlichen Daten von Zylinder zu Zylinder. Neben der Verbesserung der Einspritzsysteme, Brennraumgeometrie, Veränderung des Luftüberschusses, Druck- und Temperaturverhältnisse sowie Abgasrückführung ist auch die Zusammensetzung des Brennstoffes zu prüfen. Dabei liegt der Schwerpunkt auf realisierbaren Mehrkomponentenkraftstoffen – und zwar entweder auf herkömmlichen oder solchen, die im Sinne eines *designer-fuel* entsprechend konfiguriert werden können.

Im Projekt **Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse** [4] wurden am Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV) der ETHZ in einer optisch zugänglichen Simulationsapparatur experimentelle Grundlagen für verschiedene Brennstoffe in der homogenen, kompressionsgezündeten Verbrennung (HCCI) erarbeitet. Die Untersuchungen im Einhubtriebwerk wurden mit n-Heptan (dieselähnliches Zündverhalten) und n-Butan (benzinähnliches Zündverhalten) sowie Kombinationen von n-Butan und Diesel durchgeführt. Das Einhubtriebwerk ist in der Lage, einen mit einem konventionellen Motor vergleichbaren thermodynamischen Zustand rund um den OTP (oberer Totpunkt) zu schaffen. Durch die Flexibilität des Prüfstandes und durch die verwendeten

Kraftstoffe ist es möglich, einen grossen Bereich der motorischen Verbrennung abzudecken. N-Butan, gasförmig bei atmosphärischen Bedingungen, ermöglicht eine gute Homogenisierung vor Kompressionsbeginn. Wie bei den Versuchen mit n-Heptan waren die charakteristischen Zustände im Brennraum bei Umsatzbeginn bei einer Variation des Verbrennungsluft- und Kompressionsverhältnisses sowie der Abgasrückführungsrate (AGR) von Interesse. Es zeigte sich, dass die LTR (Tiefemperaturreaktion) und HTR (Hochtemperaturreaktion) in einem engen Temperaturbereich auftreten. Im Vergleich zur n-Heptan OH-Chemilumineszenz weisen die Versuche

mit n-Butan eine geringere Streuung auf und die Verbrennung findet im gesamten Brennraum statt. Der Vergleich der n-Butan Ergebnisse mit numerischen Ergebnissen aus dem homogenen Reaktor mit mehreren Zonen und einem am LAV der ETHZ entwickelten n-Butan Reaktionsmechanismus zeigte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Die so validierte Mehrzonen-Simulation konnte benutzt werden, um die hohe Sensitivität der Temperatur auf die Zündeinleitung zu zeigen. Durch eine thermische Inhomogenität im Zylinderkopf gelang es, bei genügend hoher Temperatur des Thermodadapters das n-Butan Gemisch stabil zu entzünden.



Figur 9: Analyse der zyklischen Streuung der OH-Chemilumineszenz der kombinierten Einspritzung von n-Butan und Dieselmotorkraftstoff bei einem Einspritzbeginn von 0.8 ms vor OTP. Linke Tafel: gemittelte Standardabweichung; rechte Tafel: mit dem Mittelwert gewichtete Standardabweichung der OH-Chemilumineszenz (11 Messungen, $\lambda_B = 4.0$, $\epsilon = 17$, $m_D = 5$ mg, $T_{Wand} = 293$ K). Es zeigt sich, dass im Vergleich zur frühen n-Heptan Einspritzung und zur reinen n-Butan Verbrennung die zyklische Schwankung abnimmt und zwar nicht nur in Zonen mit hoher OH-Intensität, sondern auch in Bereichen in Zylinderwandnähe. Diese Analyse lässt den Schluss zu, dass es somit möglich ist, eine homogene n-Butan Grundladung mit einer Dieseleinspritzung reproduzierbar mit geringen zyklischen Schwankungen zu zünden.

Die detektierte OH-Chemilumineszenz zeigt einen Umsatzbeginn in der Nähe der beheizten Oberfläche. Die zweite Inhomogenität betrifft die Einspritzung von Dieseldieselkraftstoff in eine homogen vorliegende n-Butan Grundladung. Durch die Variation des Einspritzzeitpunktes des Dieseldieselkraftstoffs sowie der Diesel- und n-Butan Masse gelang es, den Umsatzbeginn und die Wärmefreisetzungsrate der n-Butan Verbrennung zu beeinflussen (Fig. 9). Um das Zündverhalten der HCCI-Verbrennung besser charakterisieren und verstehen zu können, sollten in Nachfolgeprojekten einerseits ein Satz von Mehrkomponenten-Kraftstoffkennzahlen gefunden und andererseits die Untersuchung der Gemischaufbereitung, Zündung und Verbrennung von synthetischen Dieseldieselkraftstoffen mit gezielt veränderter Zusammensetzung (chemische und physikalische Eigenschaften) vorangetrieben werden. Das Projekt **Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse** hat eine enge Verknüpfung mit dem im November 2007 gestarteten Projekt **Kraftstoffkennzahlen der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV)** [15] in Zusammenarbeit mit drei anderen Hochschulen und mehreren Industriefirmen.

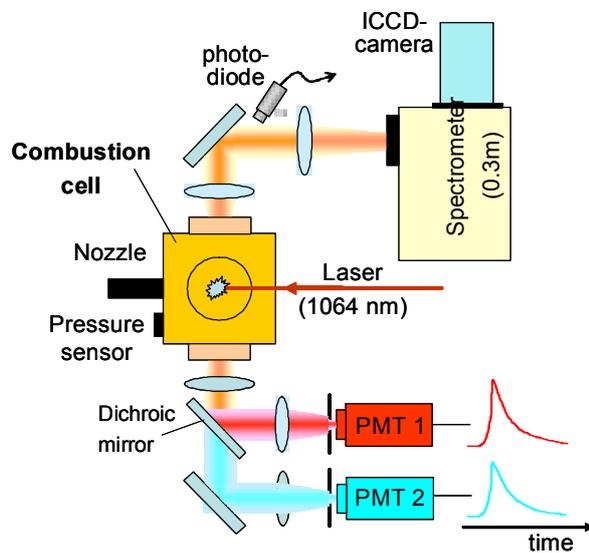
Für ein besseres Verständnis der Russbildung und Russoxidation als Funktion verschiedener Betriebsparameter wie Einspritzdruck, Brennraumtemperatur und -druck d.h. der Verbrennungsbedingungen muss die innermotorische Entwicklung der Russpartikelgröße bei der Dieseldieselverbrennung möglichst on-line und in-situ im Verbrennungsraum beobachtet und erfasst werden können.

Zur Bestimmung der mittleren Partikelgrößen von Russ während der Dieseldiesel-Verbrennung wurden im Projekt **Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressures** [5] die Methode der zeitaufgelösten **Laser-Induzierten Inkandescenz (LII)** an der am PSI betriebenen Hochdruck-Einspritzkammer eingesetzt (Fig. 10). Ein 2-Farben LII Experiment zur simultanen Registrierung räumlich aufgelöster Russemissionsspektren wurde realisiert. Transiente LII-Signale konnten zu verschiedenen Zeitpunkten nach Einspritzbeginn bei Gegendrücken zwischen 1 und 3.5 MPa und bei Einspritzdruck von 50-130 MPa aufgezeichnet werden (Fig. 11).

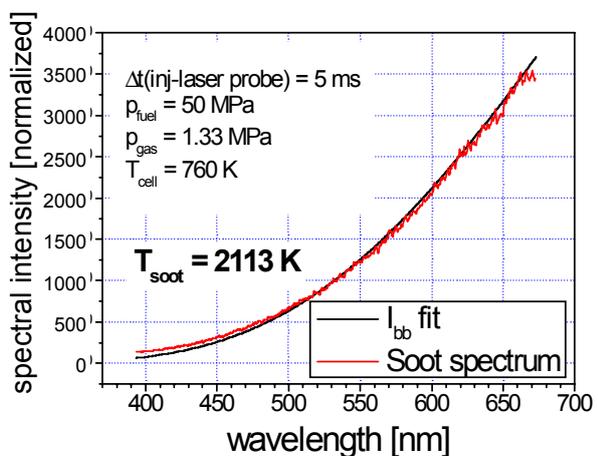
Das Abkühlverhalten der laser-aufgeheizten Partikel wurde durch Lösung der Transportgleichungen für Masse und Energie berechnet und die ermittelte LII-Signalintensität mit einem thermo-physikalischen Modell an experimentelle LII-Abklingkurven angepasst. Die Auswertung ergab mittlere Partikeldurchmesser 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. 1.35 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. Um den Einspritzvorgang detaillierter untersuchen zu können, wurde zudem eine kombinierte Messanordnung aufgebaut, welche die simultane Aufzeichnung von Schattenwurf- und Schlierenaufnahmen mit 2 separaten Kameras bei hoher zeitlicher Auflösung erlauben wird.

Resultate mit dieser kombinierten Messanordnung liegen jedoch noch nicht vor. Durch personelle Veränderungen mussten die Arbeiten teilweise ins Folgejahr verschoben werden.



Figur 10: Experimentelle Anordnung für die simultane Registrierung von transienten LII-Signalen und Russemissionsspektren an der Hochdruck-Einspritzkammer.



Figur 11: Russemissionsspektrum, aufgenommen in der Spray-Verbrennungskammer bei den angezeigten Betriebsbedingungen. An die experimentellen Daten wurde die Planck-Funktion (I_{bb}) eines grauen Strahlers angepasst.

Nationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit durch Informationsaustausch zu verbessern, war auch ein Ziel der am 05.11.2007 am PSI durchgeführten Tagung **Verbrennungsforschung in der Schweiz** [6]. Den interessierten akademischen und industriellen Forschungs- und Entwicklungsgruppen wurde dabei Gelegenheit gegeben, sich über neue Möglichkeiten der Zusammenarbeit und Forschungsförderung sowie über aktuelle Projekte zu informieren. Zudem sollte damit die in der Vergangenheit im jährlichen Rhythmus durchgeführte **Veranstaltungsreihe der Schweizerischen Vereinigung für Verbrennungsforschung (SVV)** [7] und der Interessengruppe «Combustion and Pollutant Formation (Measurement & Modeling Techniques)» des Leonhard Euler Centers (LEC) der **European Research Community On Flow, Turbulence And Combustion (ERCOFTAC)** [8] wieder aufgegriffen werden. Das Vortragsprogramm umfasste sowohl grundlagenorientierte Beiträge über neuere Ergebnisse der beteiligten Forschungsinstitute, als auch anwendungsorientierte Beiträge aus dem industriellen Umfeld in der Schweiz. Darüber hinaus wurden die Ziele und Rahmenbedingungen der Förderung der Verbrennungsforschung des BFE und der KTI vorgestellt. Die notwendigen Forschungsanstrengungen aus der Sicht der Industrie wurden durch die Schweizer Vertretung von *Wärtsilä* und *Alstom* präsentiert. Die Tagung bot zudem eine rege genutzte Plattform zum Informationsaustausch in der Gemeinschaft der Verbrennungsforschung in der Schweiz.

Noch verbesserungsfähig ist die Übersicht über die vielfältigen Aktivitäten der Fachhochschulen und deren Zusammenarbeit mit der Industrie. Die **Hochschulkompetenzgruppe für Verbrennungsmotoren (HKV)** [9] versucht das Netzwerk in diesem Bereich zu stärken. 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 dabei vertreten.

Im Projekt **Lattice Boltzmann Simulationsmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich** [1] erfolgte eine Zusammenarbeit zwischen dem LAV der ETHZ und der Gruppe für Grundlagen der Verbrennung des PSI. Dies bildet ein Beispiel für die gute Zusammenarbeit zwischen den Forschungsinstituten des ETH-Bereichs. Mit den Stärken aus dem gezielten Einsatz der unterschiedlichen Kompetenzen können die Chancen des internationalen Forschungswettbewerbs besser genutzt werden. Über das ETH-Kompetenz Zentrum Energie und Mobilität (CEEM) erfolgt heute auch über die Zuteilung der Mittel eine Koordination und Bündelung.

Die aus der Sicht der Wirtschaft wichtige Zusammenarbeit der öffentlich-rechtlichen Forschungsinstitutionen mit der Industrie erfolgt in diversen Projekten der Verbrennungsforschung in der Schweiz. Dazu gehört das vom BFE unterstützte Projekt **HERCULES** [3]. In der Schweiz sind die ETHZ und das PSI sowie *Wärtsilä Schweiz* (ehemals *New Sulzer Diesel*) Partner in diesem internationalen Projekt.

Internationale Zusammenarbeit

Neben der nationalen Zusammenarbeit erfolgt im von der EU mitfinanzierten Projekt **HERKULES** [3] ein intensiver Austausch mit Hochschulen und der Industrie auf internationaler Ebene. Das Projekt wird als Gemeinschaftsprojekt im 6. EU-Forschungsprogramm [10] gefördert. Das Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV) der ETHZ leitet im Arbeitspaket *Advanced Combustion Concepts* im Projekt *Combustion Process Simulation* das Teilprojekt *Test Facilities*. Neben der bereits erwähnten Zusammenarbeit mit *Wärtsilä* sind auch die Abo Akademi University (AAU), die Helsinki University of Technology (HUT), die National Technical University of Athens / LME (NTUA/LME) sowie die *Wärtsilä Corporation Finland (WFI)* beteiligt.

Das Projekt **Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse** [4] war Teil

einer internationalen Ausschreibung der deutschen *Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV)* [15]. Das LAV der ETHZ erhielt den Zuschlag, was seine Kompetenz und die internationale Konkurrenzfähigkeit bestätigt. Eine Zusammenarbeit erfolgt mit den Universitäten in Stuttgart und Braunschweig sowie der Fachhochschule Dresden.

Die u.a. vom BFE und BAFU aber auch von zahlreichen nationalen und internationalen Firmen unterstützte 11. ETH-Konferenz **über Combustion generated Nanoparticles** [11] fand auch 2007 wiederum grosses Interesse. Referate und Posters beschäftigten sich mit der ganzen Breite des Themas von der Entstehung des Feinstaubes in der Verbrennung, über die Möglichkeiten zur Elimination durch Filter bis hin zu den gesundheitlichen und umweltrelevanten Auswirkungen. Hinzu kamen Präsentationen über Messmetho-

den sowie die gesetzlichen Massnahmen, deren Zweckmässigkeit und Erfolge.

Im **Implementing Agreements for Energy Conservation and Emission Reduction in Combustion** der Internationalen Energie Agentur IEA [12] ist das BFE Mitglied des **Executive Committee** und Forschungsinstitute des PSI und der ETHZ sind in verschiedenen Projekten vertreten. Die 2006 gestartete Neuorientierung in der Struktur und den Inhalten der Projekte wurde 2007 fortgeführt. Bisher von einzelnen Mitgliedern bearbeiteten Aufgaben werden schrittweise abgeschlossen und durch neue in länderübergreifenden Arbeitsgruppen bearbeitete Collaborative Tasks abgelöst. Das PSI und die ETHZ sind in den Projekten *Internal Combustion Sprays, Gas Turbines und Homogeneous Charge Combustion Engine* engagiert. Jährlich findet ein Meeting statt in dem die Vertreter aus 12 verschiedenen Ländern ihre Arbeiten präsentieren. Dies bietet auch den Forschenden aus der Schweiz die Möglichkeit mit den Kollegen Erfahrungen auszutauschen. Eine starke Vertretung in dieser IEA-Arbeitsgruppe ist nach wie vor aus den USA und Japan zu verzeichnen.

Die fossilen Energieträger werden auch in den kommenden Jahren die Schweizer Energieversorgung und damit die Verbrennungsforschung dominieren. Eine Vertretung des BFE arbeitet deshalb in der **Working Party for Fossil Fuels (WFFF)** der IEA [13] mit. Diese 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 wurden die Aktivitäten der WFFF ausgedehnt, in dem mit den G8+5-Staaten Südafrika, Indien, China, Mexiko und Brasilien ein Informationsaustausch gestartet wurde. Diese Staaten sind heute massgeblich am Zuwachs des Verbrauchs an fossilen Energieträgern und entsprechend der CO₂-Emissionen sowie dem Neubau von Energieumwandlungsanlagen mit beteiligt. Aus den Berichten der IEA ist erkennbar, dass aufgrund der hohen Energiepreise erhebliche zusätzliche Vorkommen an fossilen Energieträgern nun kostendeckend gewonnen werden können. Die Reduktion der CO₂-Emissionen hat grosse Priorität und soll durch Wirkungsgradverbesserung und Eliminationsverfahren (*Carbon Capture and Storage CCS*) an den Förderstellen und bei grossen Kraftwerken angegangen werden. Erste Kohlekraftwerke mit CCS sollen grossmasstäblich in den kommenden fünf Jahren realisiert werden. An das Governing Board der IEA wurden zudem Empfehlungen für die Vorbereitung von neuen Kraftwerkseinheiten für die CO₂ Elimination (*Capture Ready*) abgegeben. Kontrovers werden die Vorschriften für die Vorbereitung der CO₂-Endlagerung diskutiert. Breite Erfahrungen bestehen noch nicht, weshalb die Sicherheitsbedenken der Öffentlichkeit bisher nicht mit Fakten ausgeräumt werden konnten.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

RÜCKBLICK

Verschiedene Projekte konnten im 2007 abgeschlossen werden. Besonders erfolgreich war das Projekt **Lattice Boltzmann Simulationenmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich** [1] in dem die gesteckten Ziele vollumfänglich erreicht wurden. Das Projekt erreichte auch international grosse Anerkennung, was mit zahlreichen Publikationen bestätigt wurde. Ein Ziel des Forschungsprogramms Verbrennung, die mathematischen Modelle zu verbessern, wurde damit erfüllt. Die Inbetriebnahme des in den vergangenen drei Jahren vollständig neu geplanten und aufgebauten Prüfstand für das EU-Projekt **HERKULES** [3] war ein weiterer Erfolg. Den Forschenden steht damit ein Versuchsträger für grosse Dieselmotoren – Zylinderdurchmesser 50 cm – zur Verfügung. Noch weitere Arbeiten sind für die anspruchsvolle Erforschung der Peroxy Radikale im Zündvorgang erforderlich. In einem Nachfolgeprojekt sollen die im Projekt **Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion** [2] gewonnenen Erkenntnisse mit der Nutzung der SLS Beamline des PSI eingesetzt werden. Erfreulich war die

Beteiligung an der in geändertem Format durchgeführten Tagung **Verbrennungsforschung in der Schweiz** [6].

AUSBLICK

- Erarbeitung des Detailprogramms für die Umsetzung des Forschungskonzepts 2008 – 2011 und Abstimmung mit der CORE [14];
- Start diverser neuer Projekte im Rahmen der Schwerpunkte des Forschungskonzepts 2008 – 2011;
- Fortführung der Aktivitäten zur besseren Verbindung von Forschungsaktivitäten der Universitäten, des ETH-Bereichs, der Fachhochschulen und der Industrie;
- Verstärkung der Kontakte zur Industrie;
- Start eines Projekts zur Erfassung der in der Schweiz in der Verbrennungsforschung engagierten Personen (Stichwort: *Who is Who* in der Verbrennungsforschung Schweiz);
- Verbesserung der Kommunikation über die Verbrennungsforschung in der Schweiz nach innen und nach aussen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter den angegebenen Projektnummern in Klammern)

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

- [1] I. V. Karlin (karlin@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Lattice Boltzmann Simulationenmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich** (SB Projekt 100'862).
- [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] K. Hermann (hermann@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **HERCULES Advanced combustion concepts, Test facility: Spray/Combustion chamber** (SB Projekt 100'706).
- [4] A. Escher (escher@lav.mavt.ethz.ch), K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse** (JB).
- [5] 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** (JB).
- [6] **Tagung Verbrennungsforschung in der Schweiz**, Peter Jansohn, PSI, Villigen (peter.jansohn@psi.ch)

Liste der P+D-Projekte

Keine laufenden Projekte im 2007

Referenzen

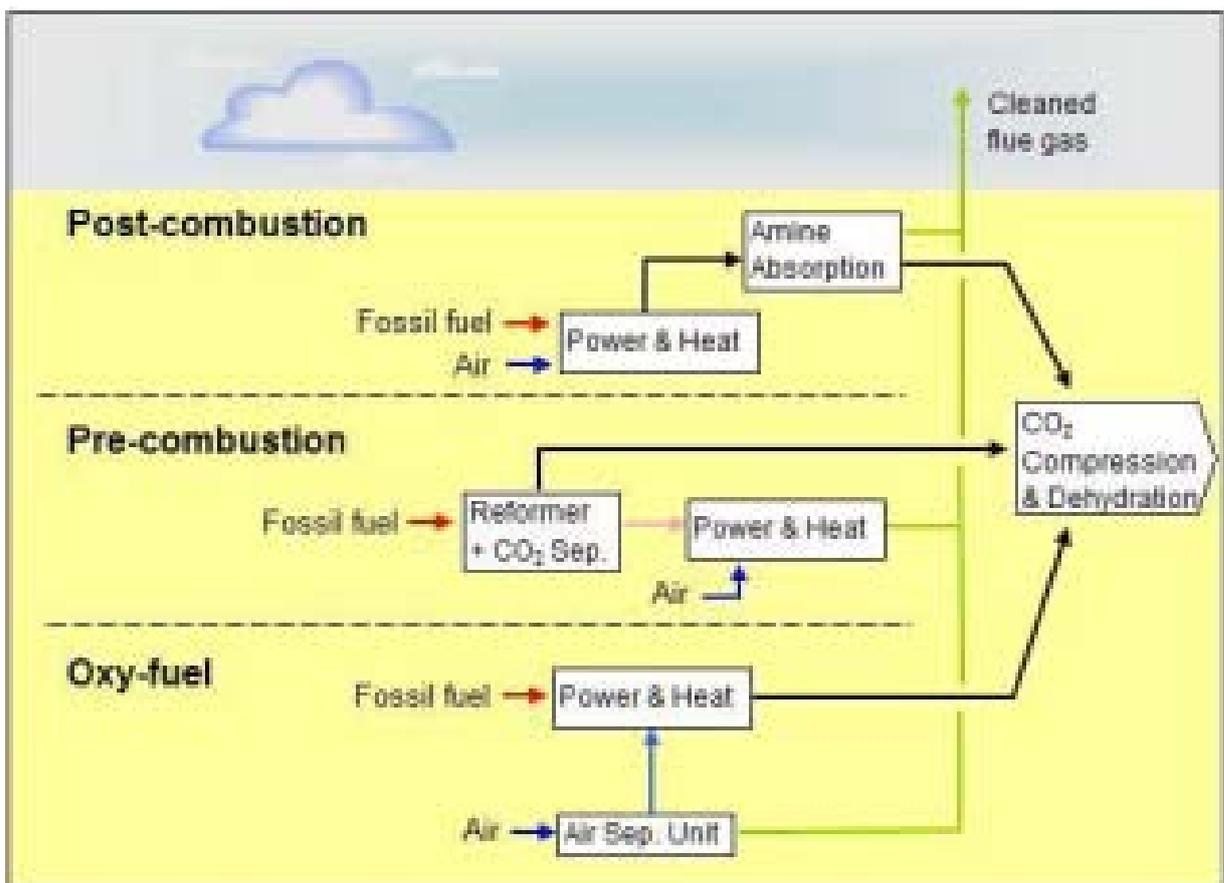
- [7] **SVV** Schweizerischen Vereinigung für Verbrennungsforschung, LAV ETHZ <http://www.lav.ethz.ch>
- [8] **ERCOCTAC** European Research Community on Fluids, Turbulence and Combustion, Coordination Centre Fluid Mechanics Laboratory, EPF Lausanne <http://www.ercotac.org>
- [9] **Hochschulkompetenzgruppe Verbrennungsmotoren** c/o J. Czerwinski, Abgasprüfstelle und Motorenlabor (AFHB), Hochschule für Technik und Informatik HTI, Biel (Jan.Czerwinski@bfh.ch)
- [10] 6. Rahmenprogramm für Forschung und Entwicklung der EU <http://cordis.europa.eu/fp6>
- [11] A. Mayer, TTM (ttm.a.mayer@bluewin.ch), Ed., Proc. 11th **ETH-Conference on Combustion generated Nanoparticles**, August 2007
- [12] **IEA** Internationale Energieagentur <http://www.iea.org>
- [13] **WPFF** Working Party for Fossil Fuels der IEA <http://www.iea.org>
- [14] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 – 2011**, http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/index.html?lang=de&dossier_id=00798
- [15] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen **FVV**; <http://www.fvv.de>
- [16] **SLS Swiss Light Source VUV**; A beamline for Vacuum Ultraviolet Radiation; PSI Villigen <http://sls.web.psi.ch/view.php/beamlines/vuv/index.html>

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

KRAFTWERK 2020

Peter Jansohn

peter.jansohn@psi.ch



Null-Emissions-Kraftwerkskonzepte (Zero Emission Power Plants) mit CO₂-Abtrennung [17]

Je nach Abscheidung des Kohlendioxids vor (*Pre-Combustion*) bzw. nach (*Post-Combustion*) der Verbrennung mit Luft od. Sauerstoff (*Oxy-Fuel*) werden 3 Typen von Kraftwerkskonzepten für Null-Emissions-Kraftwerke unterschieden.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Durch den steigenden Strom-Bedarf, das Auslaufen von Strom-Import-Verträgen und das Erreichen der maximalen Betriebsdauer bestehender Kraftwerks-Anlagen, zeichnet sich für den Zeitraum um das Jahr 2020 ein Engpass in der Strom-Versorgung der Schweiz ab. Um diese prognostizierte Versorgungslücke zu schliessen, sind Anstrengungen auf unterschiedlichen Ebenen (rationelle Stromverwendung, Ersatz von Stromerzeugungs-Kapazitäten, ...) zu leisten. Eine Option für die Elektrizitäts-Erzeugung in der Schweiz stellen dabei **Kombi-Kraftwerke auf Erdgas-Basis** dar, die aufgrund ihrer für thermische Kraftwerke hohen Effizienz und ihres niedrigen Schadstoff-Ausstosses mittelfristig in der Strom-Erzeugung von Bedeutung sind. Diese Technik ist auch deshalb für die Schweiz von besonderem Interesse, weil Schweizer Industriefirmen und Forschungs-Organisationen führend in der Weiterentwicklung dieser Technologie tätig sind und sich somit ein hohes Umsetzungs-Potential 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 CO₂-Emissionen** aus dem gesamten schweizerischen Energie-System zu kommen. Die Prozessführung des Kraftwerks ist z.B. so zu gestalten, dass alternative Brennstoffe eingesetzt werden können und CO₂ ganz oder teilweise abgeschieden werden kann (s. Titelbild, [17]). Die bisherige Strategie der Kombination von modernen, effizienten Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit Wärmepumpen muss ebenfalls weiterhin verfolgt und umgesetzt werden. Innerhalb des geplanten 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 [14]. Deshalb ist das Programm vorerst auf einen Zeitraum von ca. 10 Jahren (d.h. bis Ende 2015) ausgerichtet. Dieser Programm-Periode können sich geeignete Fortsetzungsphasen mit erweiterten, angepassten Zielsetzungen anschliessen. Die Konzentration der Programm-Aktivitäten auf Schlüsselgebiete der Dampf- und Gasturbinentechnik inkl. Generatoren ist auch aus diesem zeitlichen Aspekt heraus erforderlich. Prozesse ausserhalb des eigentlichen Kraftwerks, wie z.B. externe Brennstoffaufbereitung oder CO₂-Abtrennung und -Lagerung, sind nicht zentraler Bestandteil des Programms.

Ein wesentliches Ziel des Programms ist es, durch Bündelung der Aktivitäten und durch Koordination der Ausrichtung individueller Projekte zu einer **Stärkung des Forschungs- und Industrie-Standortes 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 Kraftwerks-Industrie, inklusive der Zuliefer-Firmen 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 Dampfturbinen-Prozesses. 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, CO₂-neutralen Brennstoffen** (insbesondere biomasse-basierenden Vergasungs-Produkten) auf 15% im produktiven Betrieb. Ferner sollen mit dem Einbezug von prozesstechnischen Varianten für die erleichterte Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO₂) darüber hinaus gehende CO₂-Emissionsminderungs-Potentiale ausgenützt werden.

Durch den zukünftig verstärkten Einsatz fluktuierender, erneuerbarer Stromerzeugungs-Technologien wie Wind und Photovoltaik werden Stromversorgungs-Netzwerke stärkeren, kurzfristigeren Produktionsschwankungen unterworfen sein, die durch die anderen Stromerzeuger kompensiert werden müssen. Ein weiteres Ziel des Programms ist es deshalb, Gasturbinen-Kraftwerke noch besser zu befähigen, die **Stabilisierung des Stromversorgungs-Netzes** zu übernehmen. Dazu müssen Techniken entwickelt werden, die höhere Lastgradienten (+/-3% Last pro Sekunde) oder gar eine netzfrequenz-unabhängige Betriebsweise erlauben.

Durch die 2007 erfolgte – weitgehende – Klärung der gesetzlichen Rahmenbedingungen für CO₂-Emissionen aus erdgasbefeuelten Kombi-Kraftwerken (Einführung der CO₂-Abgabe mit Ausnahmeregelung – in Form einer vollständigen Kompensation zusätzlicher CO₂-Emissionen – für Gas-Kombikraftwerke) [19] rückten Forschungs- und Entwicklungsthemen zur spezifischen Reduktion der CO₂-Emissionen weiter in den Vordergrund. Diese erhöhte Bedeutung wird im erweiterten Projekt-Portfolio bereits reflektiert und wird auch für den zukünftigen Ausbau des Programms eine wichtige Rolle spielen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

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 Gesamtsystem-Wirkungsgrades von Gas-Dampf-Kraftwerken zu leisten.

Die Wirkungsgrad-Steigerung soll durch eine Minimierung der Ventilations-Verluste (d.h. Verluste durch aktive Kühlung der elektrischen Leiterbahnen) erreicht werden, die gegenwärtig 40% der gesamten Generator-Verluste darstellen. Die Beiträge zur Steigerung des Wirkungsgrads sollen durch 3 Massnahmen/Weiterentwicklungen erreicht werden:

- Verbesserter Wärmetransport zwischen elektrischem Leiter und Kühlmedium durch Entwicklung eines Isolationsmaterials mit günstigeren Eigenschaften (höhere Wärmeleitfähigkeit und/oder höhere Durchschlagsfestigkeit);
- 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 Kühlluft-Gebläses (Lüfterrad ist direkt mit dem Generator-Rotor verbunden) durch eine optimierte Einlass-Geometrie 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 TOPAIR 300 MVA Generators). 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

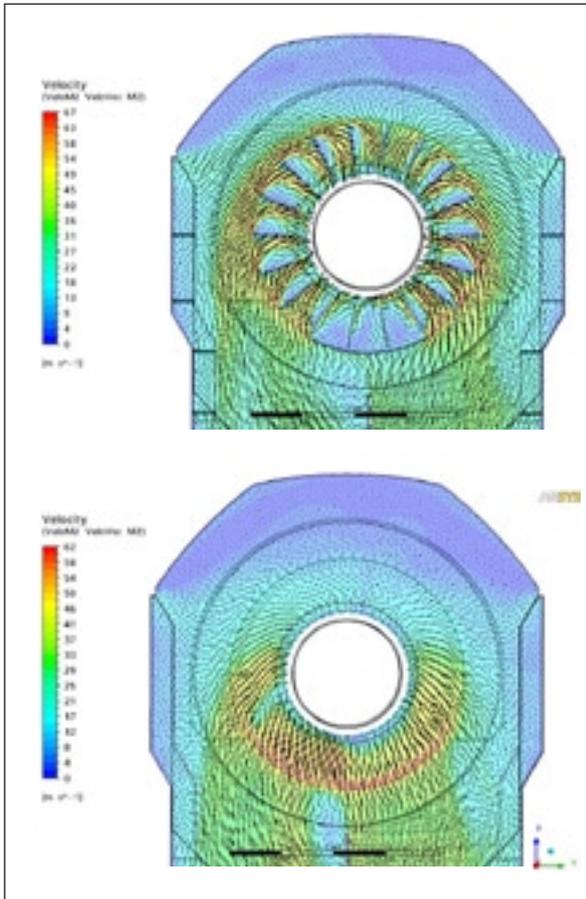
(ca. 0.35 W/mK), aber gleichzeitig verbesserter Durchschlagsfestigkeit (3.5 kV/mm anstelle der heute üblichen 2.5-3 kV/mm). Die höhere Durchschlagsfestigkeit erlaubt eine verringerte Isolationsdicke und ermöglicht dadurch ebenfalls eine bessere Wärmeübertragung. Da sich bei der Herstellung von Probestäben 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 bereits eine Materialkombination gefunden werden, die unter identischen Bedingungen eine dreimal längere Lebensdauer aufweist als das derzeit verwendete Material (*Micadur*). Diese Erhöhung der Lebensdauer der Isolation um mindestens einen Faktor drei konnte durch umfangreiche (über 150) Testreihen an Normstäben nachgewiesen werden. In einer zweiten Etappe müssen diese guten Ergebnisse an echten Statorstäben (nach Möglichkeit TOPAIR-Grösse) bestätigt werden. Erste Testreihen an TOPAIR-Stäben bestätigen bisher die guten Resultate der Vorversuche an Normstäben.

Der Schwerpunkt der Arbeiten des Forschungspartners Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) konzentrieren 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 *Computational Fluid Dynamics (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. Erst in einem zweiten Schritt wird nun ein eigenes Ventilatorrad ausgelegt mit dem der Versuchsstand später betrieben und ausgemessen werden soll.

Als Vorbereitung für die Strömungsmodellierung (*CFD*) wurde die Geometrie des Versuchstandes als *CFD*-Rechengitter generiert, wobei auftretende Spalten und Modellfehler korrigiert werden mussten. Die Vernetzung des gesamten Strömungsraumes konnte erfolgreich beendet werden, und es steht nun zur Simulation der Strömungsverhältnisse ein qualitativ hochwertiges Gittermodell zur Verfügung. Verschiedene Simulationen wurden bereits mit variablen Bedingungen (Netz-

feinheit, Turbulenzmodelle, Randbedingungen, etc.) durchgeführt. Zum Beispiel wurden Simulationen mit/ohne Leitbleche durchgeführt (Fig. 1), die die Bedeutung dieser Strömungsführungselemente deutlich hervorheben. Die Validierung der Simulationen über entsprechende Druck- und Geschwindigkeitsmessungen wird in einer nächsten Projektphase erfolgen.



Figur 1: Strömungsgeschwindigkeitsfelder im Ventilator-Gehäuse mit (oben) und ohne (unten) Leitbleche

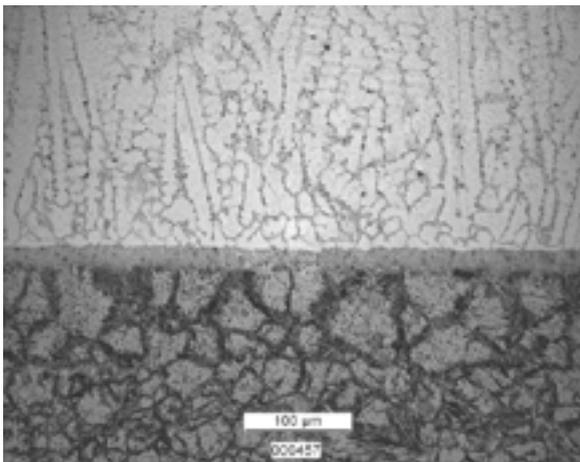
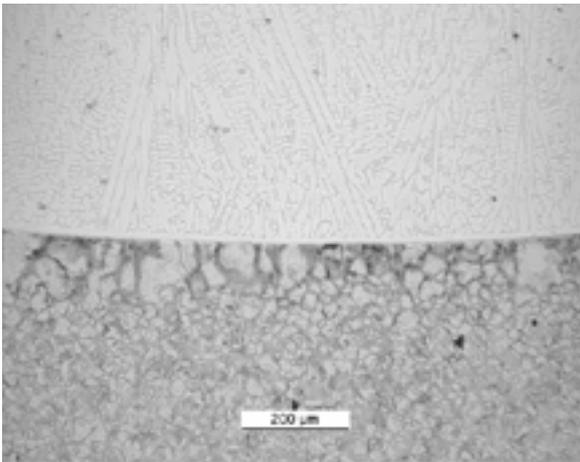
Die von der KTI geförderten Projekte **Beschichtete Schaufeln und Ventile in Dampfturbinen** [2], **Werkstoffe für Bypass-Ventile in Dampfturbinen mit hoher Dampftemperatur (650 °C)** [10] und **Hoch-effiziente Dampfturbinenschaufeln («Schlanke Schaufel»)** [3] befassen sich mit Aufgabenstellungen, die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

Der aus der Abwärme des heißen Gasturbinen-Abgasstroms gewonnene Dampf soll zur Wirkungsgrad-Steigerung auf möglichst hohe Temperaturen gebracht werden. Für Hochtemperatur-Dampfturbinen (> 600 °C) sind dann allerdings entweder höherwertige metallische Werkstoffe oder aber gar (metallisch-keramische) Beschichtungen gegen Oxidation und Erosion für die hochbelasteten Bauteile zu entwickeln (insbesondere

für die zzt. noch unbeschichteten ersten Schaufelreihen bzw. für Bypass- und Schnellschluss-Ventile, die zum An-/Abfahren/Lastregelung der Anlage benötigt werden). Durch Oxidation und Erosion rauhen 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 müssen aufgrund steigender Betriebstemperaturen auch für die Panzerung von Dampfventilen (wichtig zur Steuerung des Dampfmassenstroms beim An-/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 (Fig. 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; erste Materialproben sind derzeit in Fertigung) und zur Prüfung der Proben unter realitätsnahen Beanspruchungsbedingungen wird derzeit ein neuartiger Dampfoxidationsprüfstand an der EMPA aufgebaut, mit dem Oxidationsversuche in einer Wasserdampf-atmosphäre bei bis zu 750 °C durchgeführt werden können.

Im Projekt **Mikrowellen-Sensor zur Spaltweiten-Messung in Turbomaschinen** [11] sollen miniaturisierte, (hoch-)temperaturbeständige Mikrowellen-Sensoren entwickelt werden, die es erlauben während des Gasturbinen-Betriebs die Spalthöhe zwischen (rotierender) Schaufel und Heissgas-Gehäuse zu bestimmen und damit einer (aktiven) Regelung zugänglich zu machen. Durch die Minimierung dieser Spalthöhe (die je nach Fahrweise und Lastzustand der Turbine – aufgrund der unterschiedlichen Wärmebelastung und -Ausdehnung der statischen und rotierenden Komponenten – (stark) variieren kann) sind Wirkungsgradverbesserungen bis zu 1%-Punkt zu erwarten. Zusätzlich sind durch diese Sensoren auch Informationen über den Schwingungszu-



Figur 2: Materialgrenzschicht vor (oberes Bild) und nach (unteres Bild) einer thermischen Behandlung (10'000 Std. bei 600 °C); deutlich ist (im rechten Bild) eine Umwandlungszone an der Materialgrenzschicht zu erkennen

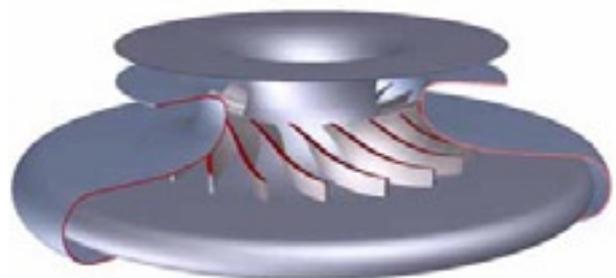
stand (Vibrationen) der Gasturbinenschaufeln zu erhalten. Damit können kritische Betriebszustände rascher erkannt, Vorhersage-Modelle validiert und verbessert werden und damit u.U. katastrophale Schädigungen (Schaufelbruch) vermieden werden. Derartige Diagnose-Instrumente sind damit nicht nur für stationäre Gasturbinen (in Kraftwerken) von Bedeutung, sondern stellen insbesondere auch für Flugzeugtriebwerke ein wertvolles Werkzeug dar, um den Betriebszustand der Maschine zu überwachen. Die Anforderungen, die an die Sensoren gestellt werden, sind: zuverlässiger Betrieb für mehr als 10'000 Std. bei Temperaturen (weit) über 800 °C.

CO₂-EMISSIONSMINDERUNG

Im Projekt **Hoch-effiziente Verdichter für Brenngase aus Biomasse** [4] werden Kompressoren weiterentwickelt, die für die Förderung der Produktgase aus Vergasungsprozessen von Biomasse (aber auch von fossilen, nicht gasförmigen Energieträgern und kohlenwasserstoffhaltigen

Prozessrückständen) benötigt werden. Hocheffiziente Verdichter für solche Produktgase (auch Synthesegase genannt, da aus ihnen auch wieder «synthetische» Kohlenwasserstoffe erzeugt werden können) sind eine wesentliche Voraussetzung um den Gesamtanlagen-Wirkungsgrad von sog. «*Integrated Gasification Combined Cycle*» (IGCC) – Prozessen zur Stromerzeugung weiter steigern zu können, da die Verdichtungsprozesse den höchsten Anteil der in neuen Kraftwerksprozessen zusätzlich aufzuwendenden Energie ausmachen. Zielsetzung des Projektes ist es, eine Synthesegas-Verdichterbaureihe zu entwickeln, die das geforderte Druck- und Volumenstrom-Spektrum möglichst effizient abdecken soll. Dazu braucht es speziell für Synthesegase (Gasgemische, die sich hauptsächlich aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂) zusammensetzen) ausgelegte Strömungskomponenten und Laufräder, die eine der Verdichtung niedermolekularer Gase (verursacht durch den hohen Wasserstoff-Anteil) angepasste Betriebscharakteristik aufweisen.

Die erste der im Rahmen dieses Projektes auszuliegenden Verdichterstufe steht unmittelbar vor dem sog. «*Design-Freeze*». Das bedeutet, dass eine Stufen-Geometrie 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 aus ein Prototyp hergestellt (Versuchsstufe), der in einem der vorhandenen Prüfstände ausgetestet wird. Ein Beispiel einer Variante ist in Fig. 3 zu sehen.



Figur 3: Designstudie einer Verdichterstufe (Laufrad mit Gehäuse)

Neben etlichen Laufradvarianten wurden insbesondere auch die sog. Rückführkanäle untersucht. Dazu gehören auch Versionen mit mehreren Reihen von Schaufeln, um eine möglichst effiziente Strömungsumlenkung und eine drallfreie Anströmung der stromab gelegenen nächsten Verdichterstufe zu erreichen. Für eine weitere Stufe wurden zwischenzeitlich rund 33 Varianten ausgelegt und mittels CFD (FINE/Turbo) untersucht. Einige dieser Varianten weisen Zwischenschaufeln auf,

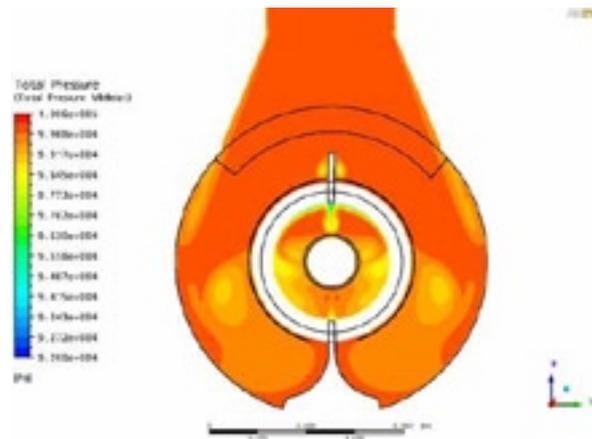


Figur 4: Designstudien von Laufrädern (links: mit einfacher Zwischenbeschaufelung; rechts: mit doppelter Zwischenbeschaufelung)

einige davon sogar zwei Reihen unterschiedlicher Zwischenschaufeln (Fig. 4). Dabei wurde die Lage der Eintrittskante der Zwischenschaufel im Meridianschnitt wie auch in Umfangsrichtung variiert.

Die Arbeiten zur Optimierung der Einläufe und Austritte (Spiralen) des Verdichters, die massgeblich an der FHNW (Institut für Thermo- und Fluid-Engineering, ITFE) durchgeführt werden, sind erheblich vorangeschritten. 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 durchgeführten Rechnungen lassen erste Schlüsse zu hinsichtlich der zu erwartenden Verluste und – von weit grösserer Wichtigkeit – der Gleichförmigkeit der Zuströmung. Die Geschwindigkeitsvektoren in einer Ebene nahe am Laufradeintritt verdeutlichen, dass die Zuströmung keineswegs homogen ist und erhebliche Winkel- und damit Inzidenz-Variationen am Eintritt des Laufrades zu erwarten sind. Dies wird auch anhand der in Fig. 5 dargestellten Totaldruckverteilung ersichtlich. Das experimentelle Versuchsmodell, mit dem die CFD-Rechnungen schliesslich validiert werden sollen, wurde zwischenzeitlich fertig gestellt und steht für erste (Druck-)Messungen zur Verfügung.

Die speziellen verbrennungstechnischen Besonderheiten beim Einsatz von Syngasen in Gasturbinen-Prozessen stehen im Mittelpunkt des Projektes **Verbrennung von Syngasen** [5]. Durch den hohen Anteil an Wasserstoff (H_2) weisen Syngase ganz spezielle verbrennungstechnische Eigenschaften (Flammgeschwindigkeit, Zündgrenzen, ...) auf, die bei der Auslegung von Brenner- und Brennkammer-Systemen berücksichtigt werden müssen, um einen sicheren (d.h. stabilen,

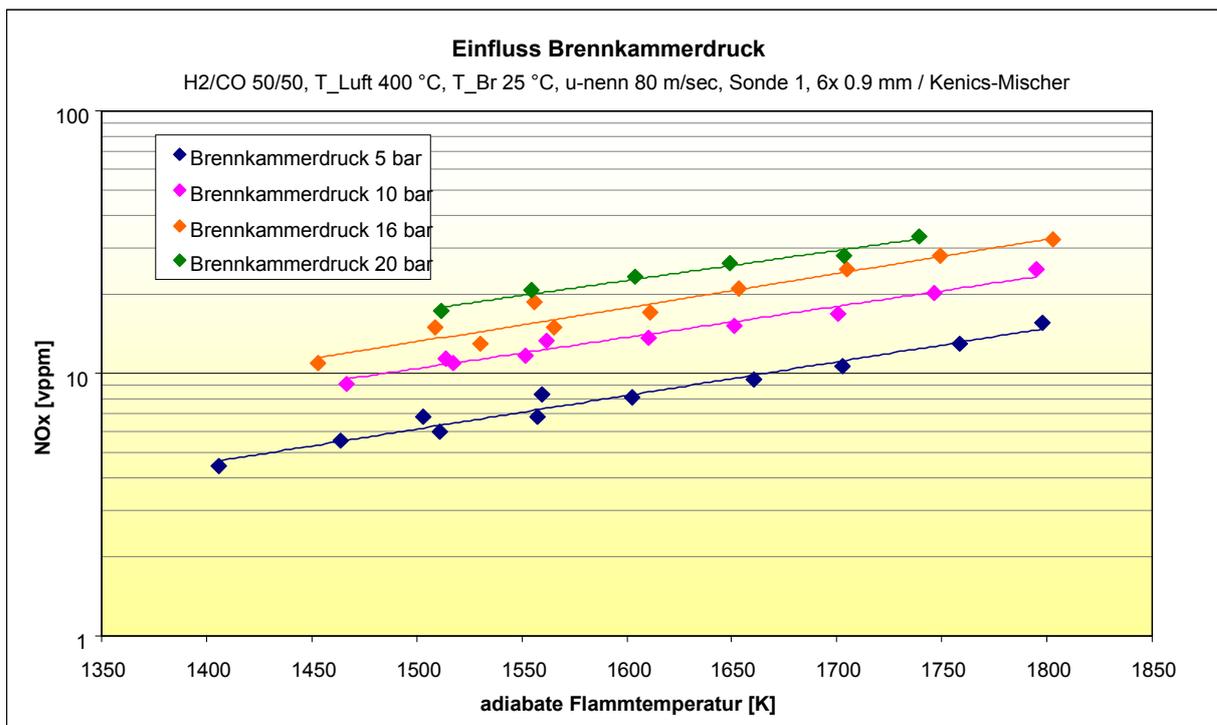


Figur 5: Totaldruck-Verteilung im Einlaufgehäuse des Verdichters

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 erdgasbetriebenen Gasturbinen zugemischt werden sollen. Dieser zusätzliche Aspekt wurde durch eine Projekterweiterung/-Ergänzung neu 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 sog. Flammgeschwindigkeit).

Auf dem Minihochdruck-Verbrennungsteststand der FHNW wurde eine grosse Zahl von Verbrennungsversuchen mit der Variation verschiedener Brenngas-Eigenschaften, wie Brenngaszusammensetzung (H_2 , CO , CH_4 , N_2), Brenngastemperatur (bis 200 °C) und Brenngaseindüsung durch-



Figur 6: Einfluss des Brennkammerdrucks auf die NO_x-Emissionen bei einer Brenngaszusammensetzung H₂/CO 50/50%

geführt. Dabei wurden ebenfalls für Gasturbinenprozesse typische Verbrennungslufttemperaturen (400 – 550 °C), Verbrennungsdrücke (5 – 16 bar) und Flammentemperaturen (1500 – 1850 K) realisiert. Die Messwerte der NO_x-Emissionen ergaben einen starken Einfluss der Brennstoffeindüsung, d.h. der Brenngas/Luft-Mischungsqualität: Varianten ohne zusätzliche statische Mischer-Elemente und Brenngaszugabe mit radialer Wandeindüsung zeigten besonders niedrige Emissionswerte. Höhere Temperaturen und Drücke sowie höhere Wasserstoffgehalte führen tendenziell zu höheren NO_x-Emissionen (Fig. 6).

Bei der Verbrennungsstabilität (magere Löschgrenze) zeigte sich ein entgegen gesetztes Verhalten. Die Verbrennungsstabilität im relevanten Verbrennungstemperaturbereich ist jedoch durch den hohen Wasserstoffgehalt der Brennstoffmischungen stets ausreichend gut. Flammenrückschlag konnte durch sprunghaftes Ansteigen des Brennerdruckverlustes sowie der NO_x-Emissionen detektiert werden. Die Tendenzen sind vergleichbar mit den Tendenzen bei den NO_x-Emissionen: Betriebsparameter, die zu höheren NO_x-Werten führen, ergeben auch eine grössere Flammenrückschlagneigung.

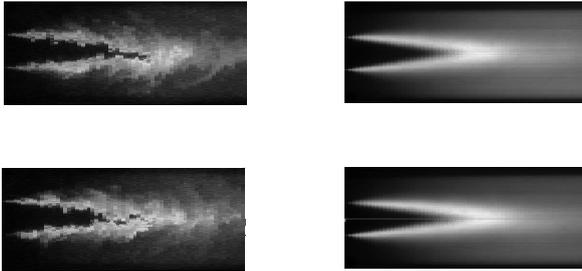
Vergleichsmessungen am optisch sehr gut zugänglichen Hochdruck-Verbrennungsprüfstand des PSI ergänzten die Messungen an der FHNW. Neben NO_x und CO-Emissionswerten konnte ebenfalls der Stabilitätsbereich (magere Löschgrenze, Flammenrückschlag) der untersuchten Syngas-Mischungen definiert und mit Flammen-

bildern dokumentiert werden (Fig. 7). Durch den Einsatz optischer (laser-spektroskopischer) Messmethoden konnten zusätzliche Informationen zur (fluktuierenden) Wärmefreisetzung und zur Lage und Form der Flammenfronten gewonnen werden. Die mit laser-induzierter Fluoreszenz (LIF) von Flammenspezien (OH-Radikalen) gewonnenen Daten (Fig. 8) 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.

Mit einer speziellen Modifikation des Gasturbinen-Prozesses zur erleichterten Abscheidung von Kohlendioxid (CO₂) aus den Gasturbinen-Abgasen befasst sich das Projekt **Gasturbinenprozess optimiert für CO₂-Minderung** [7]. Durch die gasturbinen-typische Betriebsweise mit sehr hohem Luftüberschuss sind die CO₂-Konzentrationen in Gasturbinenabgasen extrem niedrig und CO₂-Abscheidemassnahmen entsprechend ineffektiv bzw. unmöglich. Es gibt deswegen Bestrebungen, durch Prozessmodifikationen den CO₂-Gehalt im Gasturbinenabgas zu erhöhen und damit eine Abtrennung technisch möglich und wirtschaftlich attraktiver zu gestalten. In diesem Projekt wird untersucht, wie auf die veränderten Prozess-Bedingungen in der Brennkammer reagiert werden muss, um auch weiterhin eine stabile und emissionsarme Verbrennung des eingesetzten Erdgases zu gewährleisten. Die modifizierten Randbedingungen für das Verbrennungssystem erge-



Figur 7: Syngas-Vormischflamme (reales Flammenbild)



Figur 8: OH-LIF-Bilder von Syngas-Vormischflammen (links: Momentaufnahme; rechts: aufsummierte Mittelwerte)

ben sich bei der untersuchten Prozessvariante durch Zumischung von Abgasen am Eintritt in den Luftkompressor, die zu einer Anreicherung von Kohlendioxid (CO_2) im Prozessgas führt, da die Frischluftzufuhr entsprechend gedrosselt wird. Da damit gleichzeitig aber auch eine Verarmung an Sauerstoff (O_2) in der Verbrennungszone einhergeht, sind Untersuchungen in Vorbereitung, um die Auswirkungen dieses kombinierten Effektes auf die Verbrennung zu erfassen und alternative Brennverfahren zu definieren.

Auch unter diesen Prozessbedingungen sind die verbrennungstechnischen Eigenschaften (Flammengeschwindigkeit, Löschverhalten, NO_x -Emissionen) von Erdgas nicht ausreichend bekannt, um daraus notwendige Brenner- und Brennkammer-Modifikationen ableiten zu können bzw. überhaupt sichere Aussagen machen zu können, ob eine (Vormisch-)Flamme stabil betrieben werden kann. Ausser vorbereitenden Arbeiten können derzeit noch keine konkreten Projektergebnisse vorgewiesen werden, da sich aufgrund der Mischfinanzierung durch KTI, *SwissElectricResearch* und *ALSTOM* eine schwierige Konstellation bezüglich Patent- und Nutzungsrechten an geistigem Eigentum ergeben hat, welche längerwierige Vertragsverhandlungen nach sich zog.

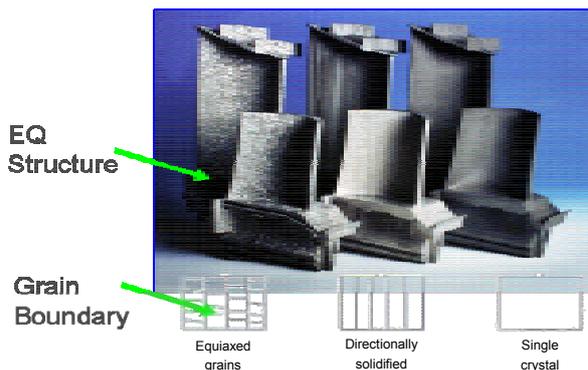
Die 2007 in Auftrag gegebene Studie **Verfügbarkeit von grasartiger Biomasse für Kombikraftwerke in der Schweiz** [12] ist eine Erweiterung des durch den *Axpo-Naturstromfond* geförderten Projektes **Graskraftwerk**, welches die technischen

und wirtschaftlichen Entscheidungsgrundlagen vorlegen soll für die Umsetzung eines mit Gras betriebenen Kombikraftwerkes. Mit Hilfe eines Geografischen Informationssystems (GIS) soll abgeklärt werden, ob der benötigte Brennstoff für ein (Gras-)Kraftwerk in der Leistungsklasse 20 bis 100 MW_{th} (auf Basis grasartiger Biomasse) in einem sinnvollen Umkreis in der Schweiz vorhanden ist. Wenn ja, soll berechnet werden, wo sich aufgrund der Biomasse «Gras» geeignete Standorte finden lassen. Darüber hinaus sollen technisch favorisierte Standorte (bereits bestehende Standorte mit entsprechender Kraftwerks-Infrastruktur) bezüglich ihres umliegenden Biomasseaufkommens geprüft werden. Ein wirtschaftlich zu betreibendes Graskraftwerk hat nach ersten Berechnungen je nach Betriebsart einen jährlichen Brennstoffbedarf von ca. 32'000 t Trockensubstanz (20 MW_{th} , 7000 h/a). Dieses Material muss «just-in-time» zur Verfügung stehen, da grosse Brennstofflager beim Kraftwerk wohl nicht praktikabel sind. Deshalb werden auch Antworten auf die Frage der Logistik und der lokalen Akzeptanz auf Seite der Biomasseproduzenten gegeben werden müssen.

GRUNDLAGEN-PROJEKTE

Im Projekt **Laser-Diagnostik in sehr mageren Flammen** [8] werden die laser-spektroskopischen Messmethoden (weiter)entwickelt, die notwendig sind um die Lage und Stabilität von Vormischflammen unter gasturbinen-typischen Bedingungen bestimmen zu können. Beim Einsatz von laser-optischen 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 Wärmefreisetzungsrates sehr gut korreliert. Der experimentelle Nachweis mittels Laser-induzierter Fluoreszenz (LIF) dieser Radikal-Spezies ist bisher unter den gegebenen turbulenten Flammenbedingungen jedoch noch nicht eindeutig gelungen und wird deshalb durch ergänzende Untersuchungen an laminaren Flachflammen weiter entwickelt.

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 Bren-



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

nerbauteils und einer Turbinenschaufel angewandt (mit speziellem Schwerpunkt auf amorpher Kristallisation, «*equiaxed solidification*») (Fig. 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 Validierungs-Abgüsse 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 Simulations-Werkzeug 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 Optimierungs-Algorithmus für die wichtigsten Giessparameter (Vorheiztemperatur der Guss-Form, Giestemperatur, 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 Programmresultate bieten und zusammen mit den in der Schweiz angesiedelten Zulieferfirmen (u.a. *Sulzer, Precicast, Stellba, von Roll, ...*) sicherstellen, dass die Programmaufwendungen vorwiegend in der Schweiz wirksam werden. Daneben wird auch eine aktive Beteiligung der Strom- und der Gaswirtschaft in der Schweiz (*SwissElectric, VSG*) angestrebt, die als Anwender bzw. Versorger ebenfalls einen wesentlichen Nutzen aus der zu entwickelnden, fortschrittlichen Technik ziehen sollen. Die äusserst anspruchsvollen technischen Ziele sind nur mit einem verbesserten Verständnis der technischen Zusammenhänge und auf einer erweiterten Basis von Grundlagen-Kenntnissen erreichbar. Diesen Beitrag zum Programm-Erfolg liefern die akademischen Institutionen der Schweizer Hochschul- und Forschungs-Landschaft (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 Voraussetzungen, einen signifikanten Beitrag zum Programm-Erfolg 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 2007: 5.5 Mio. CHF). Diese Kosten werden anteilmässig von der Privatwirtschaft (Firmen und Interessenverbände finanzieren knapp 70% der Gesamtkosten) und der öffentlichen Hand (BFE, kantonale Wirtschaftsförderungsstellen, KTI, EU) getragen.

Während der Programm-Jahrestagung am 23. August 2007 in Bern wurden die Kontakte zwischen den verschiedenen Programmteilnehmern wieder aufgefrischt bzw. neue Verbindungen geknüpft. Schwerpunktthema der Jahrestagung war die internationale Verknüpfung des Programms, insbesondere mit anderen Forschungs- und Entwicklungsprogrammen im süddeutschen Raum (**Forschungsinitiative Kraftwerke des 21. Jahrhunderts KW21** [16]) und in Europa (**EU Tech-**

nology Platform Zero Emission Power Plants, ETP ZEP [17]). Das nationale Netzwerk des Programms Kraftwerk 2020 wird regelmässig in einer Jahresveranstaltung gepflegt (nächster Termin: Juni 2008), bei der ein Überblick über den Stand der Programm-Aktivitäten geboten wird und die Gelegenheit besteht, sich über die Zielsetzungen und Rahmenbedingungen des Programms im Detail zu informieren und mit potentiellen Projektpartnern in Kontakt zu setzen.

Enge Verbindungen werden zum **Competence Center Energy & Mobility (CCEM-CH)** [15] des ETH-Bereichs gepflegt. Im Themenbereich «*Elektrizität*» im CCEM-CH besteht eine weitgehende Übereinstimmung der Zielsetzungen mit der Ausrichtung des Programms Kraftwerk 2020. Zwei der Projekte im Programm Kraftwerk 2020 (***Gasturbinenprozess optimiert für CO₂-Minderung und Verbrennung von Syngasen***) sind direkt mit Projekten im CCEM-CH verbunden. Es ist gewünscht und beabsichtigt, diese Verknüpfungen noch weiter auszubauen. Weitere Projekte sind bereits in der Beantragungs- bzw. Begutachtungsphase wie z.B. das Projekt ***Carbon dioxide management in Swiss power ge-***

neration (CARMA) [13], welches sich zum Ziel gesetzt hat einen breiten Bereich von Fragestellungen im Bereich der CO₂-Problematik zu bearbeiten (Gesamtsystemanalysen, Pre-Combustion Decarbonization, CO₂-Abscheidungstechniken, CO₂-Sequestrierung, sozio-ökonomische Fragen/gesellschaftliche Akzeptanz), und Antworten und Lösungen für die Schweiz, aber auch von internationaler Bedeutung bereitzustellen.

«Kraftwerk 2020» ist – ausgewiesen durch die Zuordnung zum gemeinsamen Bereich «Rationelle Strom- und Wärmeerzeugung» – insbesondere mit den BFE-Forschungsprogrammen «Wärme-Kraft-Kopplung» und «Feuerung und Verbrennung» verbunden. Die Stärkung flankierender Massnahmen – z.B. der Ersatz von fossil-befeuerten Heizungsanlagen durch elektrisch betriebene Wärmepumpen im Gebäudebereich – um eine Netto-Reduktion der CO₂-Emissionen aus dem gesamten schweizerischen Energiesystem zu erreichen, ist eines der verbindenden Themen. Aus der Bearbeitung übergreifender bzw. grundlegender verbrennungstechnischer Fragestellungen ergeben sich weitere verbindende Aktivitäten.

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 CO₂-Emissionen zu senken resp. durch Abscheiden und Lagern ganz zu vermeiden. Deshalb existieren in mehreren Ländern (Deutschland, England, Norwegen, USA, Japan) und Regionen (z.B. ***Forschungsinitiative «Kraftwerke des 21. Jahrhunderts»*** [16] der Länder Bayern u. 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 Programm-Konferenzen 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 Kraftwerk 2020 – Projekten im derzeit anlaufenden 7. Rahmenprogramm der EU verfolgt. Da die bisherige Erfahrung mit be-

reits 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 miteinbezogen zu werden. Durch aktive Teilnahme am Gestaltungsprozess der ***EU Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants»*** [17] erfolgt sowohl eine regelmässige Abstimmung der Aktivitäten mit anderen nationalen Programmen (der Programm- bzw. Bereichsleiter hat 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 Demonstrations-Massstab erheblicher Finanzierungssummen bedarf, sind solche Entwicklungsschritte nur auf internationaler/europäischer Ebene denkbar (dies kann auch im Rahmen bi-/multi-lateraler Zusammenarbeit zweier/mehrerer Länder erfolgen).

Über Kontakte zu themenrelevanten Initiativen der ***Internationalen Energie Agentur (IEA)*** [18] wie

der *Working Party for Fossil Fuels (WFFF)*, des *Implementing Agreements for Energy Conservation and Emission Reduction in Combustion*, sowie des *Carbon Sequestration Leadership Forums (CSLF)* wird die internationale Vernetzung der Programmaktivitäten noch weiter verstärkt. Da-

mit werden Möglichkeiten eröffnet, gemeinsame Projekte zu verwirklichen, die eine wesentlich grössere (internationale) Breitenwirkung entfalten und für die Schweiz allein ansonsten 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 Demonstrations-Charakter 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 Pilotanlagenrößen (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 bi-laterale/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 könnten sich im Rahmen des sog. **Flagship Program** der **EU Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants»** [17] in absehbarer Zeit konkret ergeben. Dazu ist aber eine aktive Haltung der Schweizer Industrie und politischen Institutionen notwendig, da in allernächster Zeit die Auswahl für eine Reihe (10–12 Einheiten) von Pilot- und Demonstrationsanlagen von Null-Emissions-Kraftwerkskonzepten in Europa getroffen werden soll, die als Vorreiter-Projekte bis zum Jahr 2015–2020 realisiert werden sollen.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Nach dem erfolgreichen ersten offiziellen Programmjahr 2006, in dem bereits insgesamt 8 Projekte im Rahmen des Programms Kraftwerk 2020 initiiert werden konnten, wurde im Laufe des Jahres 2007 das Projektportfolio konsolidiert und nur mässig erweitert (3 zusätzliche Projekte). Bis auf wenige Ausnahmen (meist bedingt durch Verzögerungen im Projektbeginn), kann in den einzelnen Projekten ein schöner Fortschritt verzeichnet werden. Alle Projektteams sind in erfreulicher Weise in der Lage ihre Fachkompetenzen in den Projektarbeiten eindrucksvoll zum Einsatz zu bringen. Dies ist auch teilweise ein Verdienst der projektleitenden Parteien, die in überwiegend Masse 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 in sehr erfreulicher und fruchtbarer Weise erfolgreich weitergeführt und sogar ausgebaut werden. Das erreichte Projekt-Portfolio ist neben der Förderung durch das Bundesamt für Energie (BFE) auch zu grossen Teilen der sehr guten Unterstützung durch die KTI zu verdanken. Da die finanzielle Ausstattung des Programms über das BFE-Budget 2007 unter den ursprünglichen Erwartungen zurückgeblieben ist und auch für 2008 – zwar erfreulich, aber trotzdem – nur mässig 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 (*Swiss ElectricResearch*) und der Gaswirtschaft zu lancieren. Auf internationaler Ebene werden Projektbeteiligungen im 7. Rahmenprogramm der EU sehr intensiv vorangetrieben werden müssen, um auch nur annähernd das angestrebte Programmvolumen (im Endausbau) von 15 Mio. CHF zu erreichen.

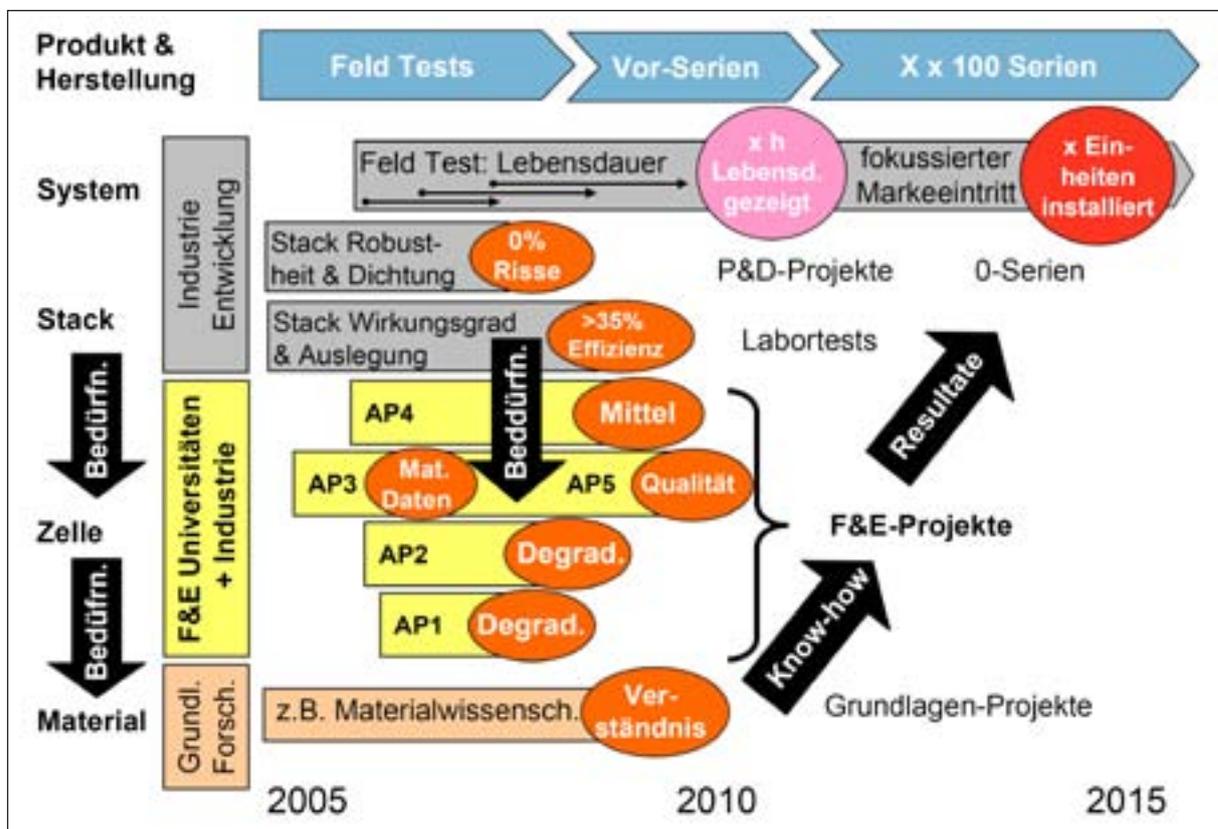
Trotz der Konzentration der Programm-Aktivitäten auf Schlüsselgebiete der Dampf- und Gasturbinentechnik inkl. Generatoren kann mit dem gegebenen finanziellen Spielrahmen nur durch eine weiterhin starke Fokussierung auf einzelne Fragestellungen ein signifikanter technologischer Fortschritt bei einigen wenigen Schlüsselkomponenten erwartet werden. Nur mit 2 bis 3 herausragenden, grossen «Leuchtturm»-Projekten (sehr wahrscheinlich nur möglich, wenn eingebunden in eine bi-/multi-laterale Zusammenarbeit über Ländergrenzen hinweg oder/und im gesamteuropäischen Umfeld) wird der Programm-Finanzrahmen deutlich ausgebaut werden können. Die spezifischen Projektthemen werden dabei sehr stark von den Kompetenzen der bestehenden schweizerischen Forschungslandschaft (ETH-Bereich, Universitäten und Fachhochschulen) sowie der Struktur der betroffenen Industriezweige bestimmt. Im Kraftwerksbereich stehen dabei sehr

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

PROGRAMM BRENNSTOFFZELLEN INKL. WASSERSTOFF

Andreas Luzzi / Michael Spirig

PLeitungHFC@hsr.ch



Roadmap zur Vorkommerzialisierung von SOFC-Brennstoffzellenprodukten

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

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

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

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

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

Im Bereich Brennstoffzellen werden folgende Werte angestrebt:

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

Im Bereich Wasserstoff werden folgende Entwicklungsschritte angestrebt:

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

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

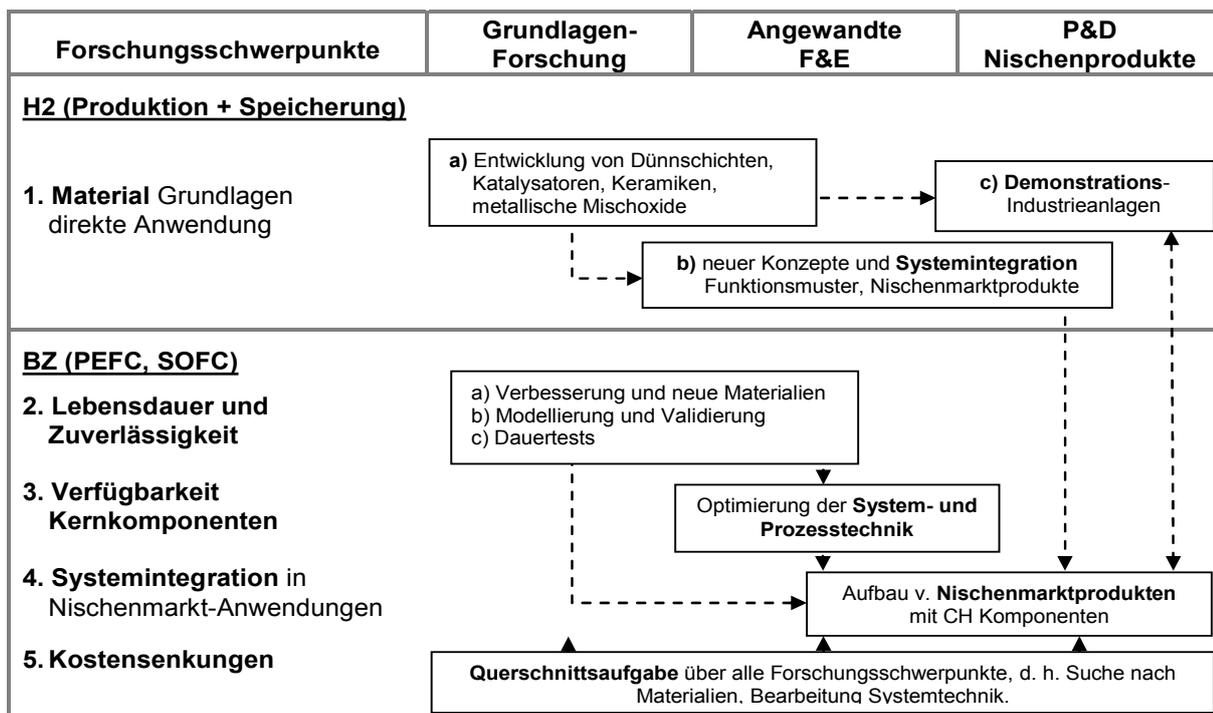


Tabelle 1: Ziele und Forschungsschwerpunkte des Programms **Brennstoffzellen und Wasserstoff** und Zuteilung zum entsprechenden F&E- sowie P&D-Bereich.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

BRENNSTOFFZELLENTechnologie

ERDGAS-FESTSTOFFOXID-BRENNSTOFFZELLEN (SOFC)

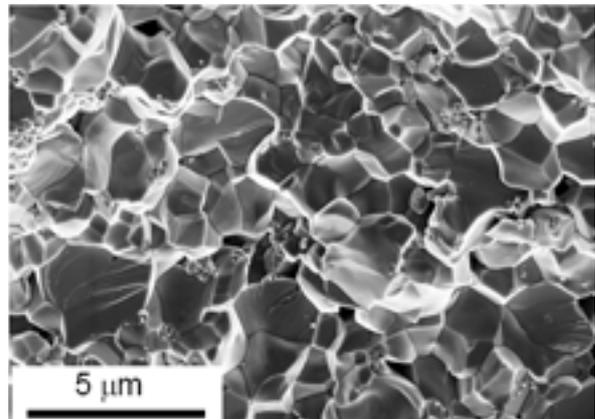
Im Rahmen des EU-Projekts **REAL-SOFC** [3] wurden – mit Schweizer Beteiligung – grosse Forschungsanstrengungen zur Reduktion der Materialdegradation von SOFC unternommen, insbesondere durch Verwendung besserer Kathodenmaterialien und Metallbeschichtungen. Auf der Stufe Materialien wurden Fortschritte auf dem Niveau Zellen mit Tests über 3'000 h Lebensdauer demonstriert. Mit den besten Materialien wurden Stacks gebaut. Jedoch überlebte keiner der getesteten Stacks 2'500 Betriebsstunden auf dem Teststand. Als wesentlicher Grund für die ungenügende Stack-Lebensdauer wurde die inhärente Schwäche der anodengestützten Zellen hinsichtlich Reoxidations-Bedingungen identifiziert. Dies ist eng mit dem bisher üblichen R-Design des Stacks verknüpft, der eine offene Nachverbrennungszone aufweist. Mit einem neuen Stackdesign, das Abgasrückführung erlaubt, konnten *HTceramix* und die *EPFL* Stackbetriebszeiten von weit über 3'000 h erzielen. Die neuen Stacks wurden von der EU als neues Referenz-Design anerkannt und erlauben Langzeitmessungen auf Material- und Komponentenebene.

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

Festoxid-Protonenleiter arbeiten im Temperaturbereich von 300 – 600 °C. Sie haben das Potential für eine Brennstoffzellentechnologie, welche die Vorteile der PEFC- und der SOFC-Technologien kombiniert. Unter den protonenleitenden elektrolytischen Materialien ist Yttrium dotiertes Bariumzirkonat (BYZ) der vielversprechendste Kandidat. Das Ziel des Projekts **Intermediate Temperature Fuel Cells Based on Proton Conducting Electrolytes** [4] war die Synthese und Charakterisierung solcher Materialien. Es konnte gezeigt werden, dass BYZ aufskalierbar ist und mit hoher Phasenreinheit produziert werden kann. Messungen ergaben eine höhere Protonenleitfähigkeit in bulk BYZ als an den Korngrenzen. Als kritischer Parameter für dieses unerwünschte



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



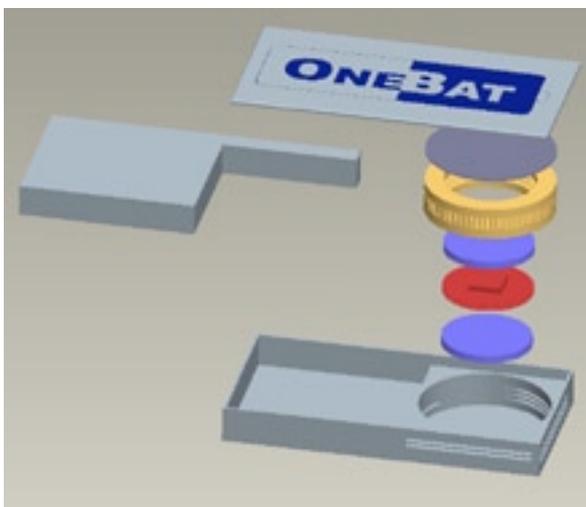
Figur 2: Bruchbild eines gesinterten BZY10 Pulvers für protonenleitende Brennstoffzellen [4]

Verhalten wurde die Struktur von BYZ an den Korngrenzen identifiziert (Fig. 2). Eine Erklärung für die niedrige Protonenleitfähigkeit an den Korngrenzen steht jedoch noch aus. Bis zum Einsatz von BYZ in Brennstoffzellen ist es noch ein weiter Weg, hingegen könnte BYZ interessant für Anwendungen im Sensorenbereich sein.

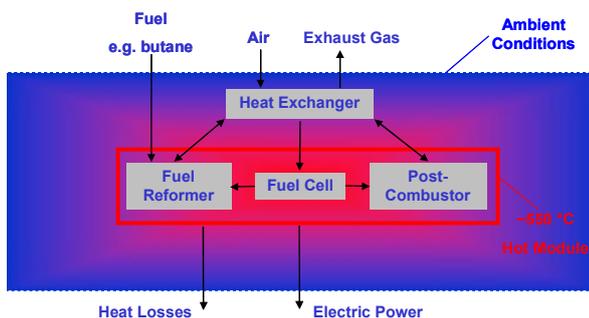
Das inter-disziplinäre Verbund-Projekt **ONEBAT** [5], in dem die Kompetenzen von fünf Hoch- und Fachhochschulinstitutionen vernetzt sind, wurde 2004 gestartet (<http://www.nonmet.mat.ethz.ch/>).

Ziel ist die Herstellung einer Butangas-betriebenen Brennstoffzelle, die kostengünstiger als herkömmliche Kleinstakkumulatoren vermarktet werden kann. Bis anhin konnten folgende Ziele erreicht werden:

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



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



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

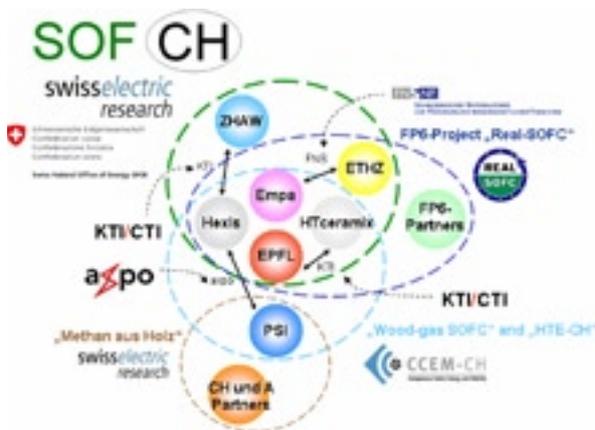
Nach wie vor leiden heutige SOFC an ungenügender Langzeitstabilität und Leistungseinbussen während ihrer Betriebszeit. Der primäre Grund ist die für die Stromproduktion typischerweise not-

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

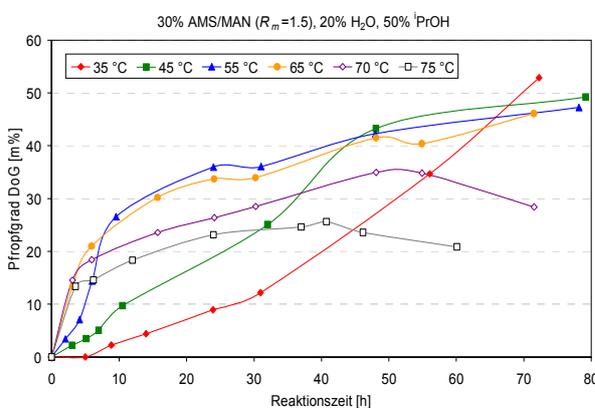
Das Konsortium ist zudem noch in ein Biogas Projekt involviert, bei dem es unter anderem um die Untersuchung des Einflusses von Biogas, auf die anodenseitige Degradation bei der SOFC geht.

POLYMER-ELEKTROLYT-BRENNSTOFFZELLEN (PEFC)

Ein wesentlicher Hinderungsgrund für den breiten Einsatz der PEFC-Technologie stellen die Kosten dar. Mit der Entwicklung verbesserter und kostengünstiger protonenleitender Polymermembranen, die als Festelektrolyte in PEFC und in H_2O -Elektrolyseuren zum Einsatz kommen, leistet das Paul Scherrer Institut (PSI) einen Beitrag zur verbesserten Effizienz und zur Kostensenkung dieser Technologien. Die Anforderungen an Polymermembranen sind komplex, da diese verschiedene Funktionen wie Protonenleitfähigkeit, Gastrennung, Grenzfläche zu Elektroden, Dichtungsfunktionen etc. zu erfüllen haben. Im Projekt **Protonen-Leitende Polymermembranen für Brennstoff- und Elektrolysezellen** [7,29] werden diese Parameter experimentell untersucht, theoretisch modelliert und optimiert. Zum Einsatz kommen Polymermembranen auf der Basis von $25 \text{ }\mu\text{m}$ dicken FEP- (Fluorinated Ethylene Propylene) Filmen mit verschiedensten



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



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

Pfropfungen. Dazu wurden Reaktionsprofile gemessen, die den integralen Pfropfgrad als Funktion der Präparationsparameter ausweisen. Um kinetische Parameter zu bestimmen und dadurch die Effekte verschiedener Präparationsparameter quantitativ miteinander zu vergleichen, wurden die gemessenen Daten mit einem vereinfachten Modell dargestellt. Die Resultate waren aber unbefriedigend und machen die Ausarbeitung eines präziseren Modells notwendig. Einige der hergestellten Membranen konnten in Brennstoffzellenversuchen getestet und auf ihre Stabilität unter den Betriebsbedingungen einer H_2/O_2 -Brennstoffzelle untersucht werden. Die erzielten Stabilitäten übertreffen jene mit Styrol als Propfkomponente erhaltenen um einen Faktor > 15 . Weitere Tests von Membranen in der Brennstoffzelle sollen diese Ergebnisse untermauern und die Effekte der verschiedenen Membraneigenschaften (Pfropfgrad, Monomerverhältnis, Ionenaustauschkapazität, Leitfähigkeit, etc.) auf das Verhalten in der Brennstoffzelle evaluieren.

Lebensdauertests unter realen Bedingungen brauchen Tausende von Betriebsstunden und ein

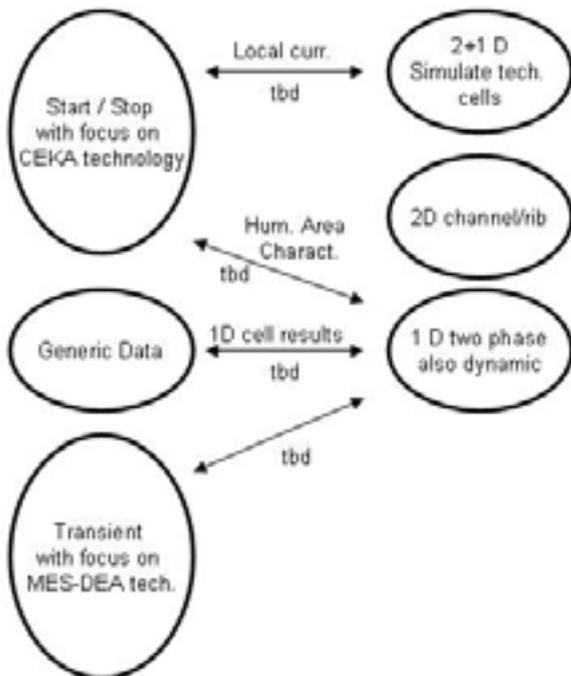
Durchsatz vieler Proben. Sie sind daher zeitraubend und führen zu einem langen Innovationszyklus, was wiederum eine kommerzielle Einführung der Brennstoffzellentechnologie weiter verzögert. Vorarbeiten zum Projekt **Lebensdauer Limitierungen von Brennstoffzellen-Membranen: Mechanismen, Methoden und Innovationen**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

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

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

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

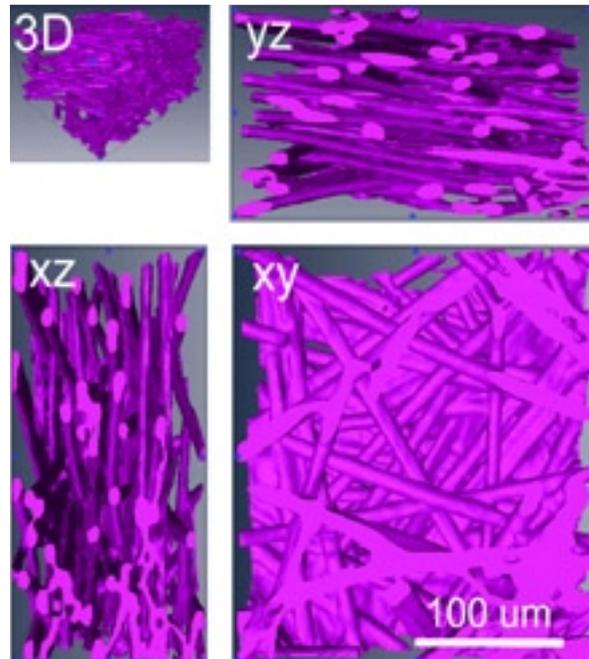
Weitere Hinderungsgründe für die Markteinführung von PEFC sind Alterungsprozesse und das schnelle Versagen der elektrochemischen Komponenten sowie die fehlende Zuverlässigkeit. Im PEF-CH-Netzwerk sollen diese Fragen in enger Zusammenarbeit mit der Schweizer PEFC-Industrie – CeKa AG und MesDea SA – vertieft angegangen werden. Im Projekt **Go.PEF-CH Enhancing PEFC Durability and Reliability under Application-Relevant Conditions** [10] sollen zwei Doktoranden diese Problemkreise, insbesondere die schnellen Laständerungen und der Einfluss der Start-Stop-Zyklen mit den neuen, am PSI entwickelten Diagnosewerkzeugen untersuchen. National wird auch mit der Berner Fachhochschule für Technik und Informatik (BFH-TI) zusammengearbeitet. Bei den Vorbereitungsarbeiten konnten unter anderem auf dem neuen Teststand der BFH-TI eine 200-Watt *IHPoS* (Integrated Hydrogen Power System) Brennstoffzelle der Firma CEKA während einer Laufzeit von 1'700 Stunden unter konstanten Bedingungen von 420 mA/cm² bei 65 °C erfolgreich betrieben werden.



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

Im **Cal.PEF-CH** Projekt, welches ein weiteres PEF-CH Netzwerk Projekt ist und in enger Verbindung und Austausch mit dem Go.PEF-CH Projekt steht (siehe Fig. 7), werden Massentransporte (Gas, Wasserdampf und flüssiges Wasser) und deren Limitationen untersucht. Dies ist wesentlich sowohl für die Optimierung der Effizienz als auch für eine bessere Einsicht in die Degradationsmechanismen der PEFC-Zellen. Die anisotropen

und mikroporösen Strukturen der Gasdiffusions-schichten (GDL), in denen der Gas-, Wasser- und Ladungstransport erfolgt, ist bisher mangels geeigneter Methoden nur wenig untersucht worden. Im **Cal.PEF-CH: Model Based Investigation of PE Fuel Cell Performance with Focus on Porous Layer Properties** [11, 31] wird nun diese Problematik experimentell untersucht und theoretisch modelliert.

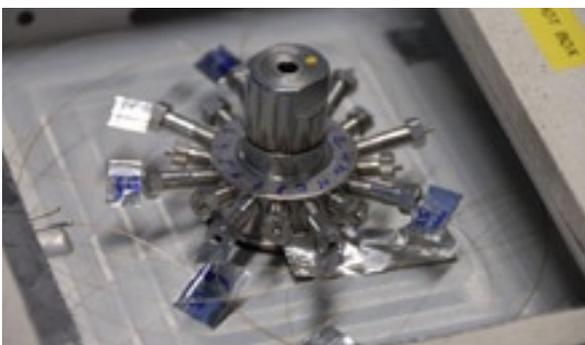


Figur 8: Hochaufgelöste, rekonstruierte Bilder (3D und in den 3 Schnittebenen) eines kleinen Volumens von toray T060 ohne PTFE [11].

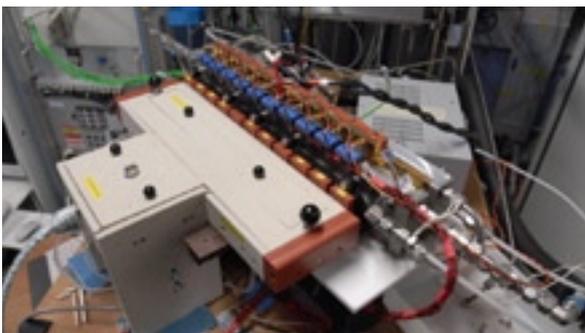
Ein weiteres Ziel ist die Charakterisierung der strukturellen Eigenschaften von GDL-Materialien, insbesondere bezüglich Gastransport und Sättigung von Wasser. Durch geeignete Modellierungswerkzeuge sollen die physikalischen GDL Materialeigenschaften mit gemessenen Daten an Brennstoffzellen korreliert werden. Dank der *Swiss Light Source (SLS)* am PSI kann zur Bestimmung der anisotropen Mikroporenstruktur von GDL-Materialien – weltweit erstmals – die Röntgenstrahlen Mikro-Tomographie eingesetzt werden. Diese hat eine genügend hohe Auflösung um die feinen Strukturen innerhalb der GDL zu bestimmen. Sie erlaubt es auch, Transportvorgänge im Innern von Brennstoffzellen dreidimensional zu verfolgen. Im Berichtsjahr wurde die Struktur von trockenen GDL-Materialien charakterisiert (siehe Fig. 8). Erstmals gelang es auch, die räumlichen Strukturen und deren Veränderungen unter verschiedenen mechanischen Beanspruchungen wie z.B. Druck zu verfolgen. Die Messmethoden und Modelle werden laufend verbessert und für 2008 sind Messungen und Berechnungen zum Transport von Gas und Wasser in GDL geplant.

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

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



Figur 9: Beheiztes Multipositionsventil der Gasentnahmestrecke [12]



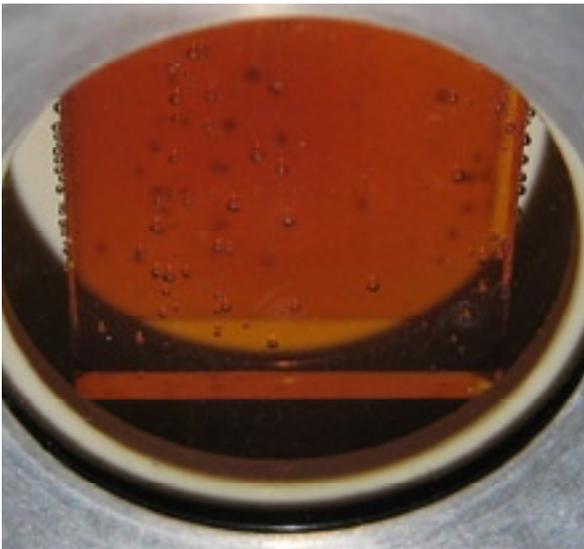
Figur 10: Gesamte Gasentnahmestrecke an der Brennstoffzelle [12]

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

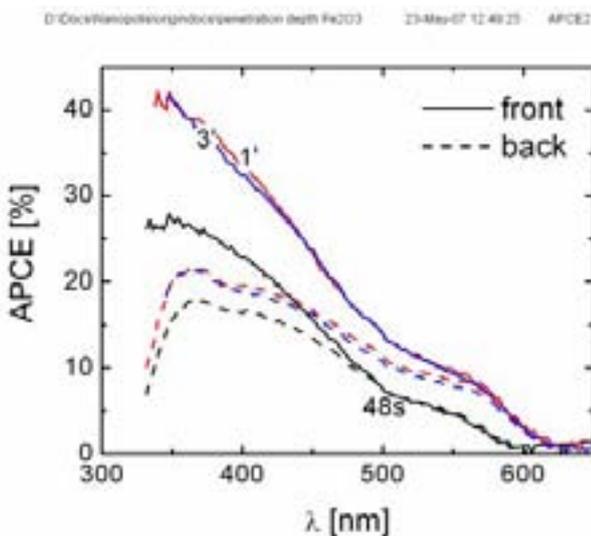
Ziel der langjährigen Forschungsaktivitäten zum Thema **Photochemische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie** an den Universitäten Bern und Genf sowie an der EPFL-Lausanne war die Photoelektrochemische Wasserspaltung mit sensibilisierten Ag/AgCl als Photoanode und einer Halbleiter Photokathode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

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

Im Projekt **NefiosHydro** [15] wird eine neuartige Produktion von Wasserstoff aus durch Solarstrahlung erzeugten Protonen angestrebt. Zu diesem Zweck bildet eine nanokristalline Elektrodenoberfläche mit lichtsensitiven Eisen-Schwefel Clustern den aktiven, Protonen erzeugenden Teil der photosynthetischen Wasserstoffherzeugung und auf der Anodenseite soll die Reduktion der Protonen katalytisch zum Wasserstoffmolekül erfolgen. Im Prinzip erfolgt die Wasserstoffproduktion in den drei in Fig. 13 dargestellten Schritten.



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

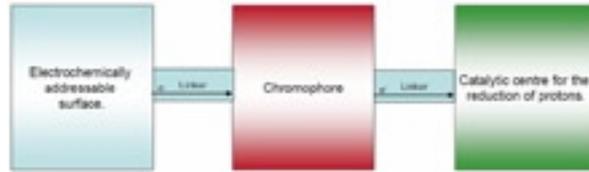


Figur 12: Absorbed photon to current efficiency (APCE) of meso-porous silicon doped hematite films on conductive SnO₂:F deposited during 48 sec, 1 and 3 min [14]

Dieser modulare Approach hat den Vorteil, dass die Blöcke einzeln getestet und die Verbindungen dazwischen individuell optimiert werden können. Drei Ziele wurden priorisiert: Die Erzeugung einer nanokristallinen Oberfläche mit Eisen-Schwefel-Clustern, die Synthese geeigneter Ru(II)-Komplexen und die Überwachung der Reduktion der Protonen zu Wasserstoffmolekülen bezüglich der angelegten negativen Vorspannung. Im Berichtsjahr wurden synthetische Pfade für biomimetische Ru(II)-Eisen Schwefel Verbindungen untersucht und Komponenten von biomimetischen Protonenreduktionssystemen wurden mit Chromophoren auf den Oberflächen kombiniert. Die Resultate sind Gegenstand zweier eingereichten Publikationen. Dieses Projekt ist Teil der interdisziplinären

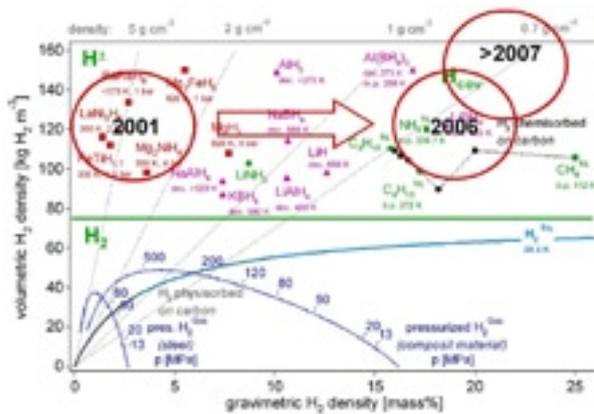
Forschungspalette der Gruppe an der Universität Basel und einige Aspekte sind in engem Zusammenhang mit einem laufenden EU-Projektteil im EU Programm HETEROMOLMAT.

Als weltweiter Pionier im Bereich spezieller Feststoff-Wasserstoffspeicherung startete die heutige EMPA-Gruppe im Jahr 2001 an der Universität



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

Freiburg ihre Untersuchungen an den Tetrahydridboraten [34]. Mittlerweile ist das Potential dieser Materialien als Wasserstoffspeicher weltweit anerkannt (siehe Fig. 14). Das Projekt **Wasserstoffspeicherung in Metall- und komplexen Hydriden** [16] widmet sich intensiv mit LiBH₄, welches mit 18-Massenprozenten die höchste Wasserstoffspeicherdichte der Familie besitzt. Erstmals konnte die Raumtemperaturstruktur mittels Röntgen- und Neutronendiffraktion sowie die Stabilität durch thermodynamische Untersuchungen mittels Differential-Scanning-Kalorimetrie anhand von H₂-Druckzellen bestimmt werden. Ebenfalls konnte ein vollständiges Energiediagramm des Materials erstellt und modelliert werden. Die Identifikation des Desorptions-Mechanismus erwies sich als besondere Herausforderung. Dank konsequentem Einsatz neuester Analyse- und Mess-System-Eigenentwicklungen konnten wesentliche Aspekte des Mechanismus geklärt werden. Mit der erstmals gelungenen direkten Synthese von LiBH₄ aus den Elementen ist auch die Herstellung von isotopenreinen Proben in Reichweite und damit auch die Aufschlüsselung der Desorptionsprodukte. Als wesentlicher Schritt im Hinblick auf mögliche Anwendungen von LiBH₄ als Speichermedium konnte die hohe Desorptionstemperatur durch geeignete Katalysatoren reduziert werden. Ebenfalls festgestellt wurde, dass im Unterdruckbereich ein substantieller Anteil an Borwasserstoff-Verbindungen in die Gasphase übergeht. Dies zeigt, dass auch die Reversibilität prinzipiell gegeben ist. Es sind jedoch noch viele offene Fragen, beispielsweise die thermischen Eigenschaften und insbesondere des Verhalten dieser Hydride bezüglich Wärmetransport und Wärmeaustausch zu klären, bevor diese Materialien zur Anwendung kommen. Die EMPA-Gruppe bringt ihre Erfahrungen in die IEA (International Energy Agency) -Projekte Hydrogen Safety und Hydrogen Storage Materials Development ein und ist bestrebt, dort ihre Spitzenposition mit weiteren Projekten zu halten.



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



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

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

- Untersuchungen der Oberflächenreaktivität mit O_2 , H_2O und Wasserstoffverunreinigungen.
- Untersuchungen von thermischen Desorptionsprodukten und der Desorptionsmechanismen auf atomistischer Basis.

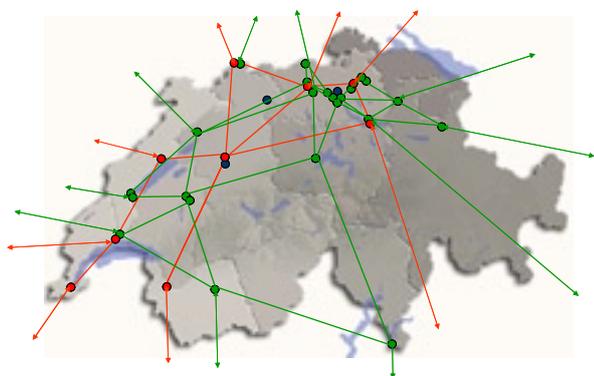
- Wärmetransport in komplexen Hydriden (im Gitter, an Korngrenzen, zwischen Teilchen und in der H_2 -Gasphase).
- Verbreitung der Ergebnisse in IEA Task 18 (Gesamtsysteme) und IEA Task 19 (Hydrogen Safety) und Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft.

Komplexe Metallhydride wie LiBH_4 erlauben höchste Wasserstoffspeicherdichten. Bevor sie als Speichermedium zur Anwendung kommen, müssen die Absorptions- und Desorptionsmechanismen von Wasserstoff sowie die Rolle der Katalysatoren genauer bekannt sein. Im Projekt **Hydrogen Storage in New Complex Hydrides (COMPHY)** [18] wird die Rolle und die lokale Umgebung eines Ti-Atoms als Katalysator mittels EXAFS und Raman Spektroskopie eingehend untersucht. Ferner wird die Ionenstruktur von $[\text{BH}_4]^-$ während der Wasserstoffdesorption untersucht und die Wasserstoffdynamik im Gitter modelliert. Zusätzlich werden UV-VIS Spektroskopie eingesetzt und durch Einsatz des Wasserstoffisotops Deuterium die Transporteigenschaften von Wasserstoff im Hydrid untersucht. Projektziel soll die detaillierte Beschreibung des Mechanismus der Sorptionsreaktion des Wasserstoffs sein. Die Arbeiten bilden den Schweizer Beitrag zum IEA Projekt Hydrogen Storage Materials Development.

Auch an der Universität Genf wird seit Jahren intensiv nach neuen Metallhydriden mit höchsten Wasserstoffspeicherdichten geforscht. Im Projekt **New Metal Hydrides Hydrogen Storage in PEM Fuel Cell Systems** [19, 35] wurden komplexe d- und p- Metallhydride für mögliche Anwendungen, insbesondere in PEFC Brennstoffzellensystemen, synthetisiert. Die Magnesium-Eisenverbindung Mg_2FeH_6 konnte kostengünstig in der Kugelmühle mit einer Rekordausbeute von 91% hergestellt werden. Das neue Hydrid $\text{La}_2\text{MgNi}_2\text{H}_8$ wurde hinsichtlich Struktur und Eigenschaften evaluiert, zeigte sich aber für mögliche Wasserstoff-Speicheranwendungen als zu wenig reversibel. Nach langjährigen Bemühungen gelang es jedoch, das äusserst komplex p-Metallhydrid $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ mittels einer neuartigen synthetischen Methode unter guter Ausbeute zu präparieren. Diese Verbindung hat eine theoretische Wasserstoffspeicherkapazität von >10 Gewichtsprozenten, gibt den Wasserstoff jedoch erst bei 150°C ab, was bei einer Anwendung in PEFC Brennstoffzellen einen Nachteil darstellt. Damit konnte das IEA-Ziel (Gewichtsverhältnis Wasserstoff/Metall > 5 wt-%) wohl erreicht, dasjenige der thermischen Stabilität (Wasserstoffdissoziationstemperatur < 80°C bei 1.5 bar Druck) jedoch nicht erreicht werden. Als Nebenprodukt der Arbeiten wurden neue Materialien entdeckt, die als Wasserstoffdetektoren geeignet sein könnten.

Nationale Zusammenarbeit

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



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

BRENNSTOFFZELLENTechnologie

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

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

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

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

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

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

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

Internationale Zusammenarbeit

Brennstoffzellentechnologie:

Im **IEA-Programm Advanced Fuel Cells (AFC)** ist die Schweiz wie in Tabelle 1 aufgelistet vertreten (www.ieafuelcell.com).

Hauptereignis im Projekt **SOFC for application** [21, 37] war der Nara Workshop, dessen Fokus die Degradationsmechanismen der SOFC und ein Aktivitäten- und Planungs-Überblick der Programme der Mitgliedsländer war. Eine koordinierte Kollaboration zu den Themen der Degradation wird von den USA, Canada und Australien als (noch) nicht relevant taxiert. Ein Start solcher Aktivitäten scheint jedoch zwischen den EU-Ländern, der Schweiz und Japan möglich zu sein. Zudem wurde ein Konsens für eine gemeinsame Datenbank für BZ-Materialien erzielt. Organisator für das 2008 Meeting ist die Schweiz; es wird im Juli 2008 zusammen mit dem FC-Symposium in Luzern stattfinden.

Im Projekt **Stationary Fuel Cells** werden die Rahmenbedingungen und die Möglichkeiten für den Markteinstieg von Brennstoffzellen für stationäre Anwendungen untersucht. Im von der CH-Vertretung geleiteten Subtask 2 Market Outlook [22] werden die für Brennstoffzellen relevanten Eigenschaften der Energiemärkte verschiedener Länder analysiert und daraus Anforderungen an die Brennstoffzellen sowie die Geschäftsmodelle für den Markteinstieg abgeleitet. Signifikant sind in den meisten Ländern die Unterschiede zwischen Strommarkt und Wärmemarkt. Der Strommarkt wird durch wenige Produzenten und grosse Produktionseinheiten gekennzeichnet. Hinzu kommt weltweit ein grosser Ersatz- und Zusatzbedarf an Stromerzeugungsanlagen, der entsprechend den bestehenden Gegebenheiten mit Grossanlagen abgedeckt werden soll. Der Wärmemarkt ist stark diversifiziert und der Absatz ist eher rückläufig. Die aktuell angebotenen Brennstoffzellen liegen im Leistungsbereich 1 – 1'000 kW und damit kaum im Fokus des heutigen Strommarktes sondern passen eher zum Wärmemarkt. In den USA wurden die Anforderungen des Strommarktes und die Veränderungen in der Verfügbarkeit von fossilen Brennstoffen in die Förderstrategie des Bundes aufgenommen. Das Ziel ist die Entwick-

lung von Brennstoffzellen im MW-Bereich für die Nutzung von Gasen aus der Kohlevergasung mit CO₂-Sequestration. Die Nutzung von Erdgas als Brennstoff wird nicht mehr unterstützt. Der Reigen der bisher im Förderprogramm SECA engagierten Unternehmen hat sich durch den Richtungswechsel gelichtet. In Japan wird demgegenüber ein Programm mit dem dezentralen Einsatz 1200 PEFC im 1 kW-Bereich und Erdgas umgesetzt. Mit der Nutzung von Brennstoffzellen als Wärmekraftkopplungssysteme wird ein Beitrag zur CO₂-Reduktion erwartet. Zwischen den beiden extremen Anwendungsbeispielen USA und Japan liegt ein Potential für Brennstoffzellen in Nischenmärkten. Dazu gehört im stationären Bereich vor allem die Nutzung von biogenen Brennstoffen (Klärgas, Biogas).

Thema des *Subtask 2 Market Outlook* [22] sind auch die Auswirkungen einer grossen Anzahl dezentral ans Stromnetz angeschlossener Brennstoffzellen auf die Stromversorgung. Erforderlich sind die frühzeitige Standardisierung sowie die Eingriffsmöglichkeit des Netzkontrolleure. Im Subtask 3 werden die technischen und marktrelevanten Eigenschaften von verschiedenen Brennstoffen für die Nutzung mit Brennstoffzellen erforscht. MCFC und SOFC weisen Vorteile für den Einsatz von Klärgas oder Biogas auf. Untersuchungen zeigen ein grosses Potential in der Landwirtschaft und zudem Betriebsgrössen, die sich für die Erzeugung von Biogas und den Einsatz von Brennstoffzellen im mittleren Leistungsbereich eignen. Die Tatsache, dass $\frac{3}{4}$ der Kosten einer Brennstoffzelle durch die peripheren Anlagekomponenten bestimmt werden, ist Basis für Subtask 4. Durch Befragungen von Brennstoffzellenherstellern und Zulieferern sollen Möglichkeiten für die Standardisierung und damit Kostenreduktion geortet werden. Erstaunlich ist das geringe Interesse der befragten Unternehmen an diesen Massnahmen. In Subtask 5 wird der Stand der Markt- und Technologieentwicklung in den USA verfolgt. Leader ist heute die MCFC von *Fuel Cell Energy*, die den grössten Anteil an neu installierten Anlagen aufweisen. Zahlreiche Projekte im unteren MW-Bereich sind in Vorbereitung. Eine verstärkte Nachfrage besteht nach PAFC von

Tabelle 1:

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

UTC-Power. Das über Jahre verbesserte 200-kW-System soll bis 2009 durch eine 400-kW-Einheit mit einer technischen Nutzungsdauer von 80'000 h ergänzt werden. In der Schweiz absolvierte zwischen 2000 bis 2005 eine 200-kW-PAFC 36'000 h Betriebstunden und erreichte einen gemittelten elektrischen Wirkungsgrad von über 39%.

Wasserstofftechnologie:

Das **IEA-Programm** bleibt weiterhin die Hauptplattform der internationalen, vor-kommerziellen Forschungszusammenarbeit im Bereich Wasserstoff, weltweit. 2007 ist nicht nur die Zahl der Mitglieder des Programms auf 21 angewachsen sondern hat auch die Schweiz ihre Mitarbeit weiter ausgebaut. Die Forschungskollaboration der Schweizer Expertengruppen im Jahre 2007 sind in Tabelle 2 aufgezeigt.

Tabelle 2:

Projekte im IEA-Hydrogen Programm	Schweizer Beitrag	Schweizer Vertreter
Executive Committee		BFE Bern
Projekt <i>Integrated Systems Evaluation</i> Systemintegration, best practice	Entwicklung von optimierten Wasserstoffsystemen	EMPA Dübendorf
Projekt <i>Hydrogen Safety</i> Erhebung von Risikomodellen, Standardisierung von Testprozeduren, best practice	Risikobewertung bei Metallhydridspeichersystemen	EMPA Dübendorf
Projekt <i>Hydrogen from Waterphotolysis</i> Identifizierung und Charakterisierung neuer Materialien, Systemanalyse, Demonstration	Leitung dieses IEA-Projekts Entwicklung von Hochleistungsphotoanodenmaterialien und Leitung von „PEChouse“ Oberflächenfunktionalisierung mittels [Fe ₂ S]-Clustern	SPF Rapperswil EPF Lausanne Uni Basel
Projekt <i>Fundamental and Applied Hydrogen Storage Materials Development</i> Identifizierung und Charakterisierung von Materialien, Systemanalyse für stationäre Anlagen	Entwicklung und thermodynamische Untersuchungen an komplexen M[BH ₄] _x -Hydriden Entwicklung von neuen komplexen d- und p-Metallhydriden	EMPA Dübendorf Uni Genf
Projekt <i>Wind Energy and Hydrogen Integration</i> Systemintegrationslösungen, Geschäftskonzepte, best practice	Regeltechnische Leistungsoptimierung von alkalischen Wasserelektrolyseuren	IHT Monthey
Projekt <i>High Temperature Processes for Hydrogen Production</i> Innovative CO ₂ -emissionsfreie Hochtemperaturprozesse	Entwicklung von Thermochemischen Metalloxid-Redox-Reaktionen für die Hochtemperaturesolarthermie Entwicklung von neuen Keramikmaterialien für die Hochtemperatur-elektrolyse	PSI Villigen EMPA Dübendorf

Tabelle 3:

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

Generell:

Tabelle 3 zeigt die Schweizer Vertretung und somit Informations- sowie Einflussmöglichkeiten in weiteren EU Aktivitäten:

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

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

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

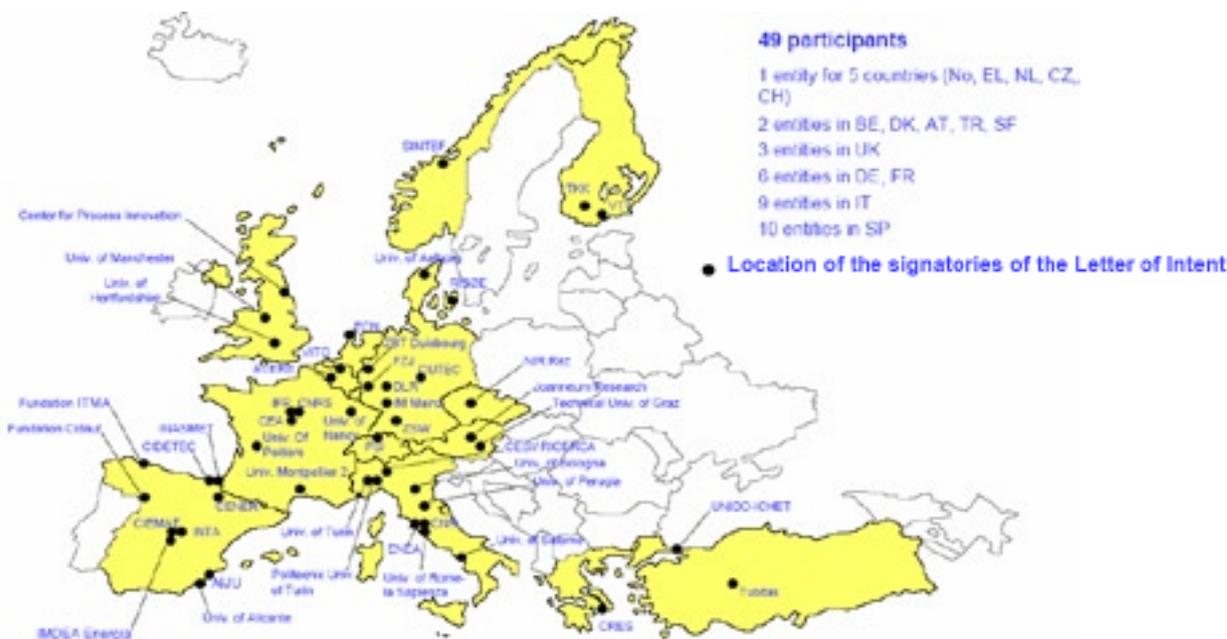
Ausgehend von der Hydrogen and Fuel cell Plattform (HFP, www.hfpeurope.org) wurde eine Joint Technology Initiative (JTI) lanciert. Momentan ist unter der Führung der Industrie (European Industry Grouping for a Fuel Cell and Hydrogen Joint Technology Initiative – NEW IG, www.fch-industry-jti.eu) die Erarbeitung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

Erfreulich ist in dieser Berichtsperiode die Beteiligung der Schweiz an EU-Projekten. Schweizer Forscher und Industriepartner sind u.a. in folgenden Projekten involviert: **Dynamics** (CO₂ capture and storage, *Alstom*), **NESSHY** (EU IP FP6 Novel Efficient Solid Hydrogen Storage Energy System, *UniFR*), **EU-SOLZINC** (300 kW_{th} Solar Reactor Carbothermic ZnO/Zn Cycle: *ZIRRUS*, *PSI*, *ETH*, *WIS*, *CNRS*, *ScanArc*), **EU-STREP** (EU-FP6, Water Vapour Electrolysis, High-tem-

perature Hydrogen Production based on SOFC Technology, *EMPA*), **FlameSOFC** (EU-IP FP6, 2 kW_{el} micro-CHP System, *HTceramix*, *EMPA*), **GenFC** (EU-STREP *EMPA*), **HySYS** (FC Hybrid Vehicle System Component Development, *EPFL*, *Fischer AG*, *Microchemical System SA*), **RealSOFC** (EU-IP FP6, Durability + Lifetime of SOFC Cells and Stacks *HTceramix*, *EMPA*, *ETHZ*, *EPFL*), **SOFC600** (EU-IP FP6, SOFC Stack at 600 °C, *EMPA*), **StorHy** (Hydrogen Storage Systems for Automotive Application, *ETHZ*).

Vertreter des BFEs und/oder des Programms haben zum direkten oder indirekten Austausch und zur Repräsentation diverse Konferenzen, Workshops und/oder Diskussionsrunden besucht. Speziell zu erwähnen bleibt das internationale **Lucerne Fuel Cell Forum 2007**.

Die im Jahr 2004 vom BFE gestartete Symposiensreihe mit internationaler Beteiligung **Fuel Cell Research Symposium Modelling and Experimental Validation** wurde 2007 am FZ-Jülich erfolgreich fortgesetzt. 2008 wird das fünfte Symposium von der *ZHW Winterthur* organisiert (11.-12. März 08, www.ccp.zhwh.ch), 2009 voraussichtlich von der Universität Karlsruhe und 2010 allenfalls wieder in der Schweiz [38, 39]. Dies zeigt, dass in diesem Bereich eine breite internationale Trägerschaft gefunden werden konnte. Neben fachlichen Vorträgen findet an diesem Symposium auch ein intensives Networking statt, welches als Nährboden für Kooperationen und auch FP7-Projekt Eingaben dient.



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

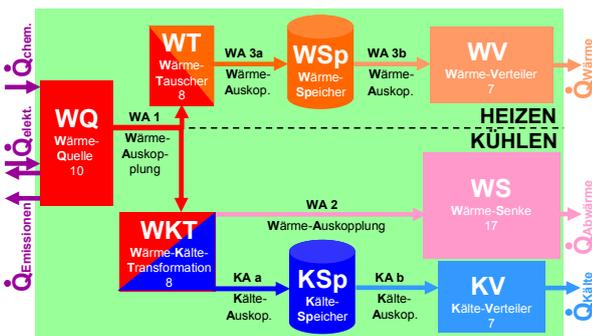
Pilot- und Demonstrationsprojekte

BRENNSTOFFZELLENTechnologie

ERDGAS-FESTOXYD-BRENNSTOFFZELLEN (SOFC)

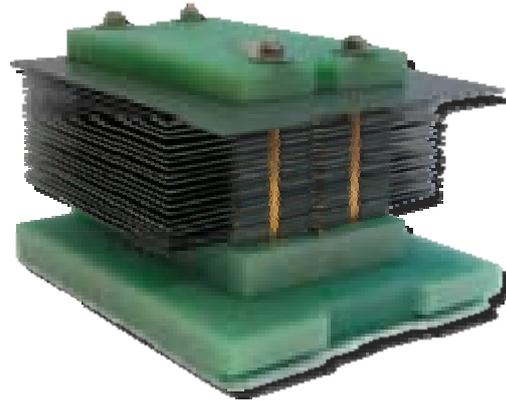
Ein ganzjähriger, durchgehender Betrieb von SOFC-Heizsystemen wäre zur Verminderung der Zelldegradation sowie einer besseren Auslastung und Generierung eines zusätzlichen Amortisierungsbeitrags sehr erstrebenswert. Eine interessante Realisierung bietet die Nutzung der der SOFC-Abwärme mittels Absorptionskältemaschine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

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



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

Zusätzlich zu ausführlichen Lebensdauer- und Labortests zum Erreichen von relevanten Benchmarks sind zudem in grösseren Gemeinden im Raum Bodensee Diskussionen über eine breitere Demonstration des WKK-Einsatzes von SOFC



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

und MCFC im Gange. Auf Schweizer Seite ist vor allem die Zusammenarbeit zwischen Hexis AG und der Stadt St.Gallen erwähnenswert, welche an der Umsetzung eines umfassenden, längerfristigen Energiekonzeptes arbeitet.

POLYMERELEKTROLYT-BRENNSTOFFZELLEN (PEFC)

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

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

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



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

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

zesses interpretiert wird. Dieses Phänomen sowie Fehlermeldungen im Betrieb der BZ werden Gegenstand vertiefter Untersuchungen sein.

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

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

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

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

Ein tragender Baustein für die künftige Umsetzung von Wasserstoffproduktionsprojekten ist die Verfügbarkeit von entsprechenden Elektrolyseuren. In dem industriebasierten KTI Projekt **Neue Membranen für alkalische Elektrolyseure (NMAE2)**

[43] werden Ersatzmaterialien für die nur noch bis 2008 (!) erlaubten Asbestdiaphragmen für alkalische Druckelektrolyseure gesucht, neue Membranen aufgebaut und ihre Einsatzfähigkeit geprüft.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

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

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

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

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

Als erfolgreiches Grossereignis im Bereich der nationalen Vernetzung betreffend Wasserstoff und Brennstoffzellen konnte Ende **2007** wieder ein **Impulstag** durchgeführt werden. Am Paul *PSI* trafen sich rund 120 nationale Vertreter von Akademia,

Forschungsinstituten und Industrien zum regen Erfahrungsaustausch und zur Vernetzung. Im 2008-2009 ist angedacht, dass technologiespezifisch «Speed-days» – Workshops zur Umsetzung von vorhandenen Impulsen in Projekte – organisiert werden. Im Brennstoffzellenbereich wird zusätzlich anfangs 2008 an der Zürcher Hochschule der Angewandten Wissenschaften (ZHAW) auch wieder eine nächste Runde des jährlichen **«Fuel Cell Research Symposium on Modelling and Experimental Validation»** durchgeführt werden. Diese beiden Events helfen unter anderem mit, ein **«Who-Is-Who»** der Schweizer Wasserstoff und Brennstoffzellen Szene aufzubauen.

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

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

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

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 vorhanden

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

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

BRENNSTOFFZELLENTechnologie

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

WASSERSTOFFTEchnologie

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

Liste der Internationalen Aktivitäten

- [20] M. Spirig, A. Luzzi (info@PECNet.org) SPF HSR Rapperswil: **PECNet Aufbau eines Schweizer Kompetenznetzwerkes für die solare Wasserspaltung mittels hybrider PV-PEC Zellen** (JB)
- [21] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Yverdon: **Participation of Switzerland in IEA Implementing Agreement, Annex XVIII (SOFC)**, (JB).
- [22] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENN Basel: **Market Outlook for stationary Fuel Cells**, (JB).

Liste der P+D-Projekte

- [23] P. Gantenbein (paul.gantenbein@solarenergy.ch), Hochschule für Technik Rapperswil HSR, Rapperswil: **Konzeptstudie Klimatisierung durch Abwärmenutzung aus Brennstoffzellen** (SB).
- [24] M. Höckel (hkm1@bfh.ch), Hochschule für Technik und Informatik, Biel: **Erweiterung des BFH Testlabors für PEM Brennstoffzellen**, (JB).
- [25] J.F. Affolter (jean-francois.affolter@hieg-vd.ch), HES-SO/HEIG-VD/IESE, Yverdon: **Intégration d'une pile à combustible 300W pour la motorisation électrique de petites embarcations**, (SB).
- [26] J.F. Affolter (jean-francois.affolter@hieg-vd.ch), HES-SO / HEIG-VD / IESE, Yverdon: **Hydrogène dans les ports**, (JB).
- [27] U. Trachte (utrachte@hta.fhz.ch), HTA Luzern: **Fortsetzung Feldtests USV für GSM-Basisstationen mit BZ**, (JB).
- [28] U. Trachte (utrachte@hta.fhz.ch), HTA Luzern: **Konzeptstudie für eine Energieversorgung mobile Basisstation Polycorn**, (JB).

Referenzen

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

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

VERFAHRENSTECHNISCHE PROZESSE VTP

Martin Stettler

martin.stettler@bfe.admin.ch



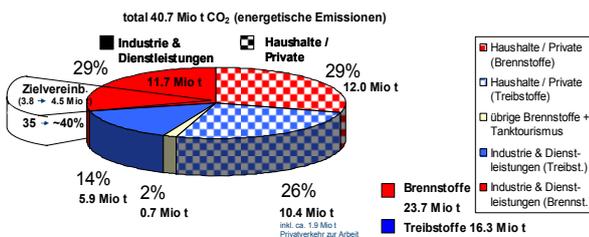
Quelle: Perlen Papier AG / Helbling

Energieintensive Papierproduktion

Die *Perlen Papier AG* ist ein weiteres Beispiel, dass mit einer umfassenden energetischen Prozessintegration (*Pinch*) weiteres (bisher unentdecktes) wirtschaftliches Energiesparpotenzial gefunden wird. Die priorisierten technisch wirtschaftlichen Massnahmen werden der Firma jährlich 3,5 Mio. CHF Energiekosteneinsparungen bei einem Investitionsbedarf von 8 Mio. CHF bringen.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Fakten: Mit einem jährlichen Ausstoss von knapp 6.7 Mio. Tonnen CO₂ aus fossilen Brennstoffen ist der Industriesektor mit rund 77'000 Betrieben der zweitgrösste Emittent von Kohlendioxid (Figur 1). Der Sektor Dienstleistungen mit rund 240'000 Unternehmen ist für einen Ausstoss von ca. 5 Mio. Tonnen CO₂ verantwortlich. Grösster Emittent bleibt der Sektor Haushalte (Heizungen) mit einem jährlichen Ausstoss von rund 12 Mio. Tonnen CO₂. Am gesamten CO₂-Ausstoss (inkl. Treibstoffe) sind die Wirtschaft mit 43% und die Haushalte mit 55% beteiligt. Diese Verteilung hat sich auch für 2007 nicht wesentlich verändert. Der Verbrauch von fossilen Brennstoffen ist leicht am sinken. Hingegen ist beim Energieträger Elektrizität und Treibstoff ein markantes Wachstum festzustellen. Es beginnt sich ein Elektrizitätsengpass abzuzeichnen. Der Fokus muss künftig also stärker auf die rationelle Elektrizitätsnutzung in industrielle Produktionsanlagen und der Verfahrenstechnik gerichtet werden.



Figur 1: CO₂-Emissionen der Schweiz im 2005. Quelle: CO₂-Inventar BUWAL 2005, Verkehrsmodell Infras und Abschätzung gemäss Mikrozensus Mobilität 2005 (ARE/BfS).

Ab dem 1.1.2008 gilt eine CO₂-Abgabe auf fossilen Brennstoffen von 3 Rp. pro Liter Heizöläquivalent. Dies hat rund 1000 energieintensive Unternehmen bewegt, mit dem Bund eine Reduktionsverpflichtung einzugehen und sich dadurch von der Abgabe befreien zu lassen. Die darin eingebundenen 3,8 Mio. Tonnen CO₂ oder 35% des gesamten CO₂-Ausstosses der Wirtschaft dürften somit bis 2010 um rund 7% reduziert werden. Die geplante Reduktionsleistung der Unternehmen bis 2010 ist mit 18% wesentlich grösser, wird jedoch durch das grosse Wirtschaftswachstum teilweise kompensiert. Mit den hohen Energiepreisen dürfte aber auch neues wirtschaftliches Energiesparpotenzial umgesetzt werden und die energieintensiven Unternehmen vermehrt in neue CO₂-arme Technologien investieren. Das

wirtschaftliche Energiesparpotenzial in der industriellen Produktion liegt nach wie vor zwischen 20% und 50%.

Ausrichtung: Das Forschungsprogramm VTP richtete sich deshalb auch im letzten Programmjahr auf das Netzwerk der Energie-Agentur der Wirtschaft aus, da diese 1500 im Zielvereinbarungsprozess stehenden Unternehmen die nötige Voraussetzung und Bereitschaft für gemeinsame Forschungsprojekte mitbringen. Das Programm unterstützte die Erarbeitung von Methoden, Werkzeugen und Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz und Senkung der CO₂-Emissionen und fördert die Integration von erneuerbaren Energien. Es unterstützte auch die Nutzbarmachung von heute noch ungenutzter Abwärme.

Schwerpunkte: Auf der Basis des *Konzepts der Energieforschung des Bundes 2004-2007* sowie den Ergebnissen diverser Plattformveranstaltungen des Sektors Industrie und Dienstleistungen von EnergieSchweiz, bestätigen sich die Programmschwerpunkte:

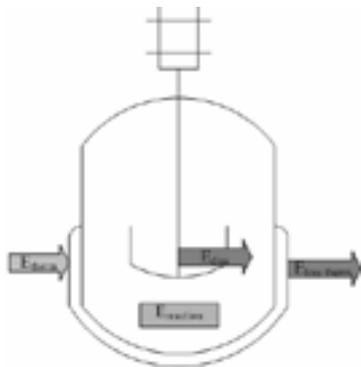
- I. **Prozessoptimierung / Prozessintegration;**
- II. **Verbesserung komplexer Produktionsverfahren;**
- III. **Effizientere Trocknungs- und Trennverfahren;**
- IV. **Nachhaltiger Umgang mit Energie und Ressourcen.**

Umsetzung: Die oben genannten Programmschwerpunkte sind u.a. in Form einer Projektausschreibung auf Internet und bei diversen Veranstaltungen der Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW) publiziert worden. Ein Umsetzungsdurchbruch gelang im Berichtsjahr mit der Einführung/Ausbildung von fünf EnAW-Moderatoren in die Prozessintegration (*Pinch-Analyse*) und Umsetzung in fünf Pilotunternehmen der EnAW. Die Resultate dieses *Pinch*-Pilots konnte anlässlich der EnAW-Fachtagung im November erfolgreich vorgestellt werden (siehe <http://www.bfe.admin.ch/energie>, Rubrik Unternehmen). Basis dazu wurde mit dem Programm VTP gelegt. Damit ist die Prozessintegration als Thema in der Umsetzung angelangt und wird von EnergieSchweiz (Bereich Prozess- und Betriebsoptimierung PBO) weiter verbreitet. Dort wird nun auch die Entwicklung eines vereinfachten, kostengünstigen *Pinch*-Ansatzes (*Top-Down Pinch*) für KMU vorangetrieben, die Methode sollte 2008 vorliegen und bei der EnAW in die Pilotanwendung gehen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

I. PROZESSOPTIMIERUNG UND -INTEGRATION

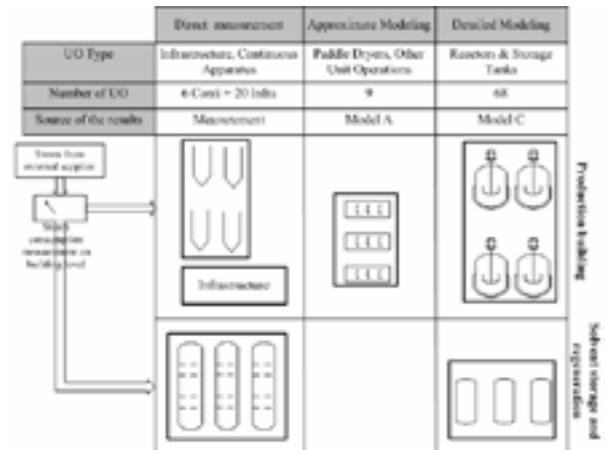
Das 2004 gestartete Projekt **Modeling and Optimization of Energy Consumption in Multi-purpose Batch Plants** [1] hatte zum Ziel, mit geeigneten Modellen (*Top-down* und *Bottom-up*) ein verlässliches Vorhersage- und Optimierungsinstrument für den Energiebedarf chemischer Mehrprodukte-Batchbetriebe zu entwickeln. Dabei soll der produktespezifische Energiebedarf (Elektrizität, thermische Energie) aufgrund der jeweiligen Prozessdaten (Betriebsvorschrift) prognostiziert werden, damit Herstellprozesse energetisch optimiert werden können. Eine Erkenntnis war, dass verlässliche Vorhersagen des Energiebedarfs und damit auch die Erkennung von Optimierungspotenzial bei Mehrprodukte *Batch*-Betrieben nur mit *Bottom-up*-Modellen möglich ist.



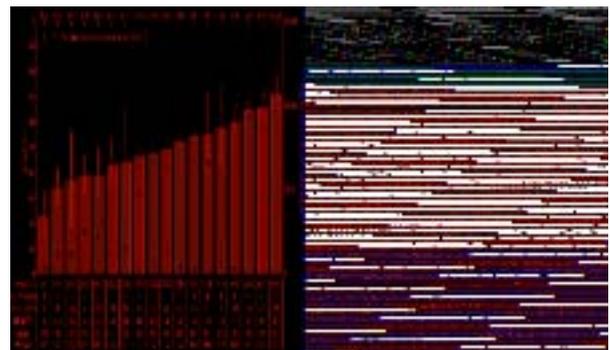
Figur 2: Energieströme Heizung/Kühlung eines UO.

Die *Bottom-up* Methode besteht aus der energetischen Modellierung der wichtigen Einheitsoperationen (UO=Reaktoren) eines typischen *Batch*-Betriebes (Figur 3). Die Validierung erfolgte anhand diverser Direktmessungen auf Stufe Prozessanlagen und Gebäude. Für die UO wurde jeweils eine detaillierte Energiebilanzierung erstellt (Figur 2). Um die Modelle zu eichen, wurden über zwei Monate die Messwerte der Prozessparameter als Inputdaten aufgenommen. Damit die Energieeffizienz des dominierenden Energieverbrauchers, Dampf überprüft werden konnte, beschränkte sich das Modell auf die einzelnen UO und verzichtete auf eine weitere Aufspaltung nach Produkten (Figur 4). Als Modell-Input wurden Messdaten von über 1000 Messstellen in über 100 UO erfasst und in Zeitreihen mit gemeinsamer Zeitbasis zugeordnet. Spezielles Augenmerk wurde auf die möglichst reale Bestimmung der thermischen Verluste der UO gelegt. Es konnte ein allgemein gültiges Modell für die Reaktorverluste entwickelt und validiert werden. Einerseits konnte die Energieeffizienz der UO so ermittelt aber auch gerade die punktuellen Optimierungsmöglichkeiten identifiziert werden. Im untersuchten *Batch*-Betrieb der *Ciba* konnte mit der Methode bei bisher 6 Reaktoren Reduktionsmassnahmen von 3500 Tonnen Dampf resp. 390 t CO₂ ermittelt werden.

Die Überprüfung und Massnahmenplanung läuft über das abgeschlossene Forschungsprojekt bei der *Ciba* weiter.



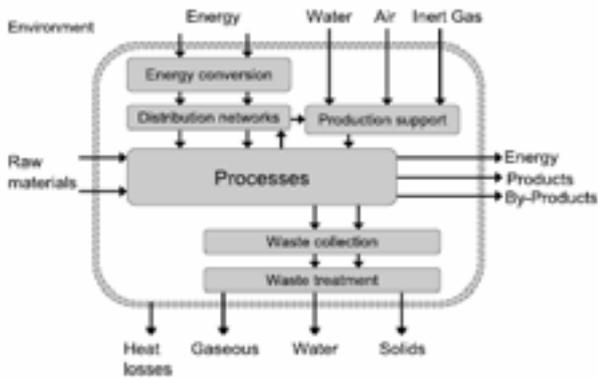
Figur 3: Bottom-up Modell des untersuchten Batch-Betriebs.



Figur 4: Effizienz des Dampfverbrauchs in verschiedenen Reaktoren unter Berücksichtigung verschiedener Nominalvolumen (NV), Materialien – Rostfreier Stahl (SS), verglaster Stahl (SE) und Typen des H/C-Systems – half-pipe coil (HP) und Doppelmantel (DJ)

Das Forschungsprojekt **Efficient Energy Conversion in the Pulp and Paper Industry, EECPI** [2] fügt sich mit einer Fallstudie in das internationale Projekt *Novel Technologies for Energy Efficiency and Eco-Industrial Clusters in the Pulp and Paper Industry*, E³PAP ein. Am Beispiel von Borregaard konzentrieren sich die schweizerischen Forschungsarbeiten auf die energetische Integration der energieintensiven Prozesse der Lignin-, Cellulose, Ethanolherstellung. Die Energieversorgungssysteme (utilities) werden ebenfalls mit der *Pinch*-Methode untersucht und einer energetischen Integration unterzogen. Ziel der Prozessintegration ist es, in einem Prozesssystem (Figur 5) die horizontalen Ströme zu maximieren und die vertikalen Ströme möglichst zu minimieren.

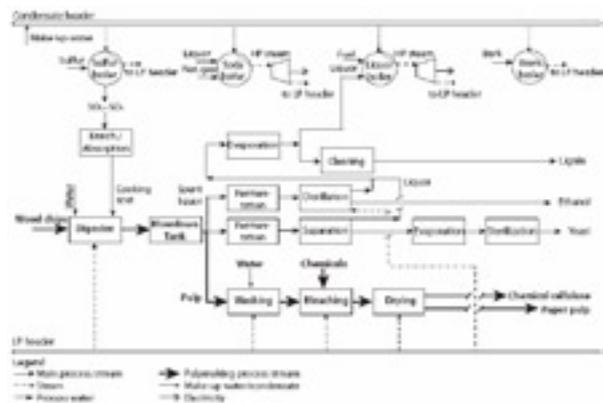
Anhand von Modellen (*data reconciliation Models*) für die Energieumwandlung, -verteilung und



Figur 5: System der Prozessanalyse.

Produktionsprozesse konnten die Prozessanforderungen ermittelt werden. Mit einem *top-down* Ansatz, wurden einerseits der Energieeinkauf des Unternehmens sowie die vorhandenen Energieumwandlungstechnologien unter die Lupe genommen. Eine erste Analyse der Energieumwandlungssysteme ergab Sparpotenzial bei den gasbefeuerten Kesseln durch Abwärmenutzung der Abgase und Erhöhung der Dampfkondensatnutzung. Mit der systematischen Aufnahme aller sich erwärmenden und sich abkühlender Prozessströme (*Pinch-Analyse*) aller wesentlichen Prozesse (90% des Dampfverbrauchs) konnte der minimale Energiebedarf (MER) der Prozesse ermittelt werden (Figur 6). Die Dampferzeugungsleistung beträgt heute ca. 75 MW; könnte die Wärmequellen und Wärmesenken aller wichtigen Prozesse ohne Einschränkung zusammengeschaltet werden (MER) so wäre nur ein mittlere Wärmeleistung (Dampferzeugung) von rund 39 MW nötig. Es liegt auf der Hand, dass dieses Sparpotenzial durch Prozessintegration bei bestehenden Prozessanlagen nicht voll realisiert werden kann. Es wurde mit zwei *Pinch-Ansätzen* (*dual representation method*), d.h. dem *Utility-Pinch* und dem *Thermodynamik-Pinch* gearbeitet. Als Resultat dieser dualen Methode konnte im Berichtsjahr Reduktionsmassnahmen beim Dampfverbrauch von 21%, Massnahmen (WRG) zur Senkung des Wärmebedarfs von 48% gefunden werden. Die Optimierung der Dampfturbine für die Stromproduktion führte zu einer Senkung der Energiekosten von 54%. Weiteres Optimierungspotenzial könnte erschlossen werden, wenn die bestehende Energieinfrastruktur umgebaut/erneuert werden könnte und die Analyse somit nach rein thermodynamischen Gesichtspunkten durchgeführt würde. Als letzter Projektschritt (2008) werden die gefundenen Massnahmen einer technisch ökonomischen Beurteilung unterzogen (Triagierung) zur Festlegung konkreter umsetzbaren Massnahmen.

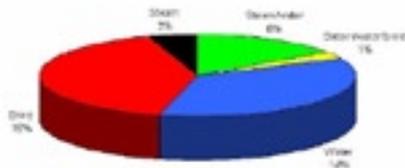
Neu konnte ein gemeinsames Projekt der EPFL und ETHZ **Advanced integration of energy conversion, production processes and waste**



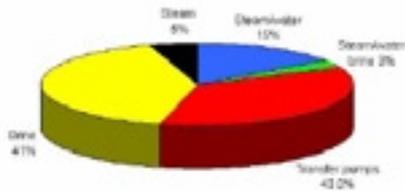
Figur 6: Vereinfachtes Prozess-Diagramm.

management in batch plants [3] gestartet werden. Hauptziel ist es, eine neue Methode zu entwickeln um das Integrationspotenzial zwischen Energieumwandlung und Energieversorgungssystemen, Produktionsprozessen und Abfallbewirtschaftung in *Batch*-Betrieben der chemischen Industrie zu identifizieren und zu realisieren. Dies unter Berücksichtigung einer variablen Produktpalette, der zur Verfügung stehenden Reaktoren und Prozess-Layouts. Vom BFE wird die Erprobung/Validierung der Methode als Fallstudie in einem Chemiebetrieb (*Syngenta*) unterstützt. Die ersten Projektarbeiten galten der Datenaufnahme eines typischen Produktionsgebäudes. Die Daten der Energieumwandlungssysteme, der Abfallbewirtschaftung und der Produktionsprozesse wurden untersucht. Von den Produktionsprozessen wurden die Massen- und Energieflüsse aufgenommen und einfache Modelle der Einheitsoperationen (Reaktoren) erstellt, um umfassende Massen- und Energiebilanzen erstellen zu können. Etwa 40 Energieübertragern, wie Reaktoren, Kondensatoren, Wärmetauscher, Vakuumpumpen und Trockner wurden aufgenommen. Ihr Anteil am thermischen Energieverbrauch ist in Fig. 7 dargestellt. Ebenfalls wurde der Stromverbrauch aufgenommen und den Hauptverbrauchern zugeordnet (Fig. 8).

Mit dem Projekt **Gesamtenergiestudie mit der Pinch-Methode Perlen Papier AG** [4] konnte gezeigt werden, dass mit einer energetischen Prozessintegration wirtschaftliches Sparpotenzial gefunden werden kann, das bei herkömmlichen Energiestudien im Verborgenen geblieben wäre (Figur 9). In der *Perlen Papier AG* werden pro Jahr rund 175'000 Tonnen LWC-Papier und 132'000 Tonnen Zeitungspapier produziert. Der Primärenergieverbrauch beträgt dabei 482 GWh_{el} Strom (ohne PECO Verfahren), 58 GWh_{th} Erdgas (Hu), 168 GWh_{th} Heizöl S sowie ca. 164 GWh_{th} aus der Verbrennung von Reststoffen. Durch die hohen Preissteigerungen der fossilen Energieträger und des Stroms machen die Energiekosten einen hohen Teil der Gesamtkosten der Produktion aus. Einsparungen des Wärmebedarfs wirken sich

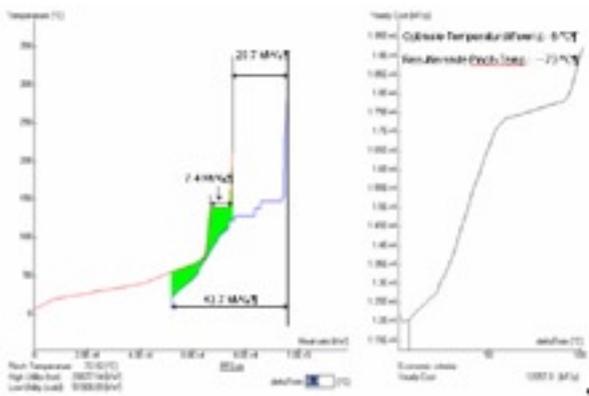


Figur 7: Verteilung der Energieübertragung.



Figur 8: Verteilung des Stromverbrauchs.

direkt auf den kosten- und CO₂-relevanten Verbrauch von Schweröl und Erdgas aus. Es wurden Prozesse mit einem thermischen Leistungsbedarf von insgesamt 43.7 MW_{th} untersucht. Davon werden heute 7.4 MW_{th} durch die Dampfproduktion in der TMP gedeckt, 7 MW_{th} leistet die bereits bestehende Wärmerückgewinnung. Der benötigte Leistungsbedarf an Primärenergie (Erdgas, Heizöl, Reststoffe) könnte theoretisch nochmals um 9.4 MW_{th}, verglichen zu heute, reduziert werden.



Figur 9: Pinch-Analyse ohne Spritzwasservorwärmung.

Unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeit und verfahrenstechnischer Umsetzbarkeit konnten 19 Einzelmassnahmen mit einem Einsparpotential von 7.1 MW_{th} resp. 59 GWh_{th}/a evaluiert werden. Dies entspricht etwa 75% des mit der Pinch-Analyse definierten Potentials. Die Hauptmassnahmen sind klassische Wärmerückgewinnungen mit zum Teil wesentlichen Flächenvergrößerungen der Wärmetauscher, welche aufgrund der deutlich gestiegenen Energiekosten möglich und rentabel wurden. Die Massnahmen umfassen auch Prozessanpassungen. So wird zum Beispiel der Trockensubstanzgehalt des Papiers vor der thermischen Trocknung durch Erhöhung der Spritzwasser- und Siebwassertemperatur-

levels vergrössert, so dass weniger thermische Trocknungsenergie notwendig wird. Nach Realisation aller vorgeschlagenen Massnahmen kann der Energiebedarf um bis zu 15% (Wärme) bzw. 0.7% (Strom) verringert werden. Dies entspricht jährlichen Einsparungen von bis zu 3.5 Mio. CHF bei Investitionen von total etwa 8.0 Mio. CHF. Die priorisierten Massnahmen erreichen zusammen einen Payback von 1.9 Jahren.

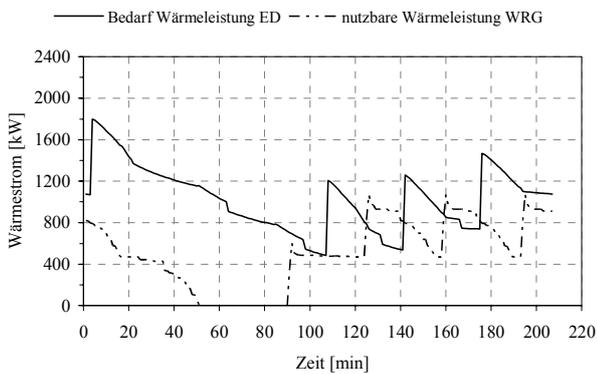
II. VERBESSERUNG KOMPLEXER PRODUKTIONSVERFAHREN

Mit dem Projekt *Optimierung Wärmerückgewinnung Batch-Polymerisation* [5] soll untersucht werden, wie die Verschmutzung des Wärmerückgewinnungssystems durch die verschmutzten Brüden reduziert werden kann, damit die Wärmeübertragungsleistung möglichst lange erhalten bleibt. Die Nexis Fibers AG betreibt in ihrem Werk in Emmenbrücke Batch-Polymerisationsprozesse. 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 Ablagerungen in den Wärmetauschern (*Fouling*, Fig. 10), wodurch die Leistungsfähigkeit der WRG markant reduziert wird. Des Weiteren entstehen durch die Schwadendampfvernichtung grosse Exergieverluste, die sich negativ auf die Effizienz des Gesamtsystems auswirken. Schliesslich weist der Prozess relativ hohe Schadstoff-Emissionen auf. Das Hauptziel des Projektes ist, die WRG-Anlage zu ersetzen, um die beschriebenen Mängel zu beseitigen, die Effizienz markant zu verbessern und die Anlage auf die zukünftigen Bedürfnisse auszurichten. Dazu wird der Prozess mit Hilfe von Messungen und theoretischen Berechnungen systematisch analysiert. Die Analyse des *Foulings* zeigt, dass bereits dünne Schichten den übertragenen Wärmestrom markant reduzieren. Verschiedene Varianten zur Reduktion bzw. zur Beherrschung des *Foulings* werden untersucht und verglichen. Eine viel versprechende Lösung ist die Brüdenwäsche, die verhindern soll, dass *Fouling* verursachende Stoffe in die WRG gelangen. Dieses Verfahren wird im kommenden Jahr weiter ausgearbeitet und mit grosser Wahrscheinlichkeit realisiert. Anschliessend soll eine Messkampagne durchgeführt werden, mit welcher die Effizienzsteigerung bzw. die Reduktion der CO₂- und Schadstoff-Emissionen quantifiziert wird (Erfolgskontrolle). Aufgrund der bisherigen Untersuchungen wird erwartet, dass der prozessenergiebedingte CO₂-Ausstoss um mehrere Tausend Tonnen pro Jahr reduziert werden kann.

In Fig. 11 ist beispielhaft der zeitliche Verlauf der nutzbaren Wärmeleistung aus der WRG (Angebot) und der benötigten Wärmeleistung in den Eindampfern (Nachfrage) dargestellt, wenn 4



Figur 10: Ablagerungen im Wärmeaustauscher (Fouling).



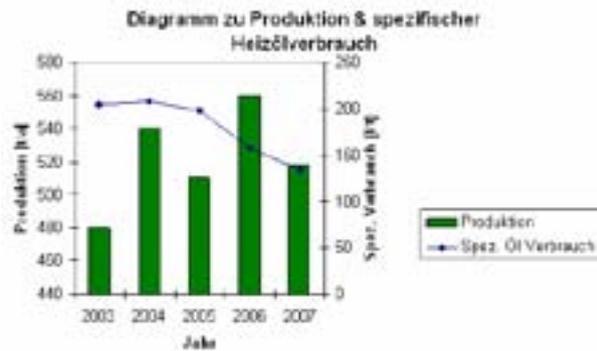
Figur 11: Zeitlicher Verlauf Wärmeangebot und -Nachfrage.

von 6 Produktionsstrassen in Betrieb sind. Es ist ersichtlich, dass in diesem Fall das Angebot die Nachfrage zeitweise übersteigt. Die neue WRG muss in einer Vielzahl von Betriebssituation eine möglichst effiziente Energieregeneration gewährleisten. Die erarbeiteten Ergebnisse dienen als Grundlage für die Auslegung der neuen WRG.

III. ENERGIEEFFIZIENTERE TROCKNUNGS- UND TRENNVERFAHREN

Im Rahmen des Projekts **Effizienzsteigerung von landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen** [6] geht es darum, den energieintensiven Trocknungsprozess (Wasserverbrennen) zumindest teilweise durch ein mechanisches, CO₂-freies Verfahren zu ersetzen. Die mechanische Vorpressung des Trocknungsgutes ist ein nahe liegender Lösungsansatz. Die qualitativen Auswirkungen auf das Trocknungsgut (Gras, Mais) wurde jedoch bisher nie wissenschaftlich abgeklärt. Durch Vorpressung werden bei der anschließenden thermischen Trocknung von Gras der Energieverbrauch und die CO₂-Emission markant reduziert. Erste Analysen des Nährwertgehaltes haben gezeigt, dass das Vorpressverfahren die Futterqualität nicht mindert. Die mit dem Vorpressungsverfahren hergestellten Futtermittel sind vergleichbar mit äquivalenten handelsüblichen Produkten und der entsprechend publizierten Empfehlung des Handels.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe der Versuchspresse, welche noch nicht optimiert ist, bereits eine Reduktion des Heizölverbrauchs



Figur 12: Einfluss der ersten Vorpressversuche auf den spezifischen Ölverbrauch.

um 35% erreicht wurde (Fig. 12). Die damit verbundene Reduktion der CO₂-Emissionen beträgt ca. 100 Tonnen CO₂ pro Jahr. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass der Trocknungsprozess durch die auf den Versuchspartellen jahreszeitlich bedingt wesentlich geringer anfallende Biomasse nicht optimal gefahren werden konnte. Die energie- und kostenintensive Produktion von getrockneten Futtermitteln kann also überregional bzw. global durch mechanische Entwässerung mit Hilfe einer Vorpresse in relevanten Größenordnungen verbessert werden. Die Vorpressung bringt auch Trocknungsanlagen, welche mit z.Z. noch günstigerem Erdgas trocknen, wesentliche ökonomische Vorteile. Obwohl die Bodenuntersuchungen noch nicht abgeschlossen sind, deuten die vorliegenden Zwischenergebnisse zum pH-Wert an, dass sich das Presswasser grundsätzlich für die Düngung eignet. Die Ausbringung von Presswasser auf die Felder kann in Kombination mit bereits üblichen Massnahmen zur Senkung des pH-Wertes des Bodens eine ökologisch-effiziente Alternative zur Anreicherung des Bodens mit Nährstoffen wie die Elemente Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium darstellen.

IV. NACHHALTIGER UMGANG MIT ENERGIE UND RESSOURCEN

Ziel des Projekts **FINE-CHEM – an inventory estimation tool for fine chemicals** [7] ist es, ein Werkzeug für die schnelle und einfache Erstellung von Inventardaten (Massen- und Energiebilanzen) der Produktion von Feinchemikalien zu entwickeln. Herkömmliche Methoden führen bei Feinchemikalien zu einem extrem hohen Arbeitsaufwand. Deshalb werden Voll-Inventarisierungen nur selten und im Rahmen von Fallstudien durchgeführt. Das zu entwickelnde Werkzeug soll eine genügende Abschätzung von Inventardaten bereits in der Phase der Produktplanung ermöglichen. Dadurch werden sich mehrere Alternativprodukte bezüglich des wahrscheinlichen Energieverbrauches bei der Produktion vergleichen lassen. Des Weiteren können verschiedene Produktionsmöglichkeiten für ein neues Produkt verglichen werden, so dass energieaufwändige

Prozesse frühzeitig identifiziert und vermieden werden können. Zuletzt werden auch bestehende Prozesse ohne aufwändige Messungen auf übermässigen Energieverbrauch hin untersucht und optimiert werden können.

Im Berichtsjahr konnten die strukturbasierten Modelle auf der Basis neuronaler Netze stark weiterentwickelt werden. Die Modelle wurden mit Trainings- und Testsets erstellt, um sie mit unbekanntem Daten zu testen und so ihre Generalisierungsleistungen zu ermitteln. Aus den Arbeiten ergab sich, dass die strukturbasierten Modelle ein breites Anwendungsfeld haben, für die Erstellung der Modelle jedoch eine solide Datenbasis kritisch ist. Daher wurde die industrielle Zusammenarbeit stark weiterentwickelt. Da das Interesse an den Modellen in der Industrie allgemein hoch ist und die bisherigen Ergebnisse viel versprechend sind, entschlossen sich mehrere Industriepartner zu weiterer, teils sehr umfangreicher Bereitstellung von internen Produktionsdaten, und ein neuer Partner konnte in *GlaxoSmithKline* gewonnen werden. Am bedeutendsten war der Beitrag der *BASF*, welche der ETHZ in Ludwigshafen einen Monat lang Zugriff zu den Inventardaten ihrer Ökoeffizienzgruppe gab. Durch die Kooperationen stieg die Zahl der für den internen Gebrauch vorhandenen Chemikaliendaten für Analysen von 103 auf ca. 350 an. Die Daten müssen teilweise noch detailliert bearbeitet und ergänzt werden.

Das neue Projekt ***Development of an Environmental Decision-Support-Tool to Optimize Co-Processing of Waste in the Cement Industry*** [8] hat zum Ziel, ein Ökobilanzierungsmodell inkl. Bewertungstool der Abfallverwertung bereit zu stellen. Der Brennprozess der Zementgewinnung ist sehr energie- und auch CO₂-intensiv (2005: 13'000 TJ). Die thermische Verwertung von brennbarem Industrieabfall als Substitution teurer, hochwertiger Brennstoffe hat deshalb in die Zementindustrie Tradition und beträgt heute knapp 50%. Diese Abfälle könnten aber auch in anderen Branchen mit anderen Verfahren verwertet respektive wieder aufbereitet (*recycling*) wer-

den. Das vorliegende Projekt wird die heute noch fehlenden Grundlagen und Bewertungsmodelle schaffen, damit Unternehmen und insbesondere auch Behörden ihre Entscheide betreffend Abfallverwertung auf einer ganzheitlichen Beurteilung abstellen können.

Im Berichtsjahr konnten Lebenszyklus-Modelle für die Klinkerproduktion, Kehrlichtverbrennung, Deponierung, Kompostierung, Altölaufbereitung auf Excel erstellt werden. Es wurde entschieden das Bewertungstool inkl. Benutzer-Interface für die Klinkerproduktion (Zement) den anderen vorzuziehen, damit dieses 2008 in die Testphase gehen kann. Das Zement-Modell wurde in enger Zusammenarbeit mit *Holcim* erstellt. Damit sind die Daten aktuell und von hoher Qualität. Die Daten für die andern Modellfälle wurden aus wissenschaftlichen Publikationen zusammengetragen. Die Datenqualität wird als hoch, die Aktualität (Standard) eher als mittel beurteilt. Die Modelle bieten die Möglichkeit, spezifische Prozessparameter an den jeweiligen Stand der Technik anzupassen. Damit lassen sich weltweit Verwertungsmethoden mit unterschiedlichen Standards vergleichen. Fallstudien zeigen, dass der Energieverbrauch, -rückgewinnung, sowie die energiebezogenen Emissionen die stärkste Umweltwirkung haben. In der Zementherstellung hat die Art des Brennofens wegen der unterschiedlichen Energieeffizienz den grössten Einfluss auf die Umweltwirkung. Einen ebenfalls grossen Einfluss haben die primär eingesetzten fossilen Brennstoffe, welche durch Abfallbrennstoffe ersetzt werden. Wichtig ist aber auch, ob eine Rauchgasbehandlung vorhanden ist oder nicht. Bei der Deponierung ist es für die Umweltwirkung entscheidend, ob die entstehenden Gase gefasst und verwertet werden. Bei der Fermentierung und Kompostierung von Biomasse kommt es auf die Effizienz der Biogasproduktion an. Bei der Raffinierung von Altöl spielen die Rückgewinnungseffizienz und der thermische Energiebedarf die entscheidende Rolle.

Nationale / internationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr unterstützte das Programm insgesamt fünf Projekte aus dem ETH-Bereich. Zwei Projekte konnten aus dem Fachhochschulbereich unterstützt werden. 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 im Energieforschungsbereich 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 IEA Programm *Industrial Energy-Related Technologies and Systems* (IETS) aufgenommen. 2008 wird das Interesse der Schweizer Industrie (EnAW-Unternehmen) an einer Zusammenarbeit mit der IEA ermittelt.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Zwei laufende Projekte hatten während 2007 einen Stillstand. Das Projekt **Stromproduktion aus Abwärme** muss wegen Ausstieg eines Industriepartners neu aufgesetzt werden. Beim Projekt **Analyse der Trockner bei Pavatex AG** wurde der Stillstand durch einen verschobenen Investitionsentscheid ausgelöst. Diese Projekte werden 2008 wieder aktiviert.

Auf Grund einer BFE-Reorganisation wird das Programm ab Januar 2008 von Martin Pulfer, BFE (martin.pulfer@bfe.admin.ch) übernommen und aufgrund der CORE-Vorgaben (Konzept 2008-2011) neu definiert.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 vorhanden

(siehe http://www.bfe.admin.ch/energie/00572/00604/index.html?lang=de&dossier_id=00810)

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer)

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

- [1] Andrej Szijarto (andrej.szijarto@chem.ethz.ch), ETH Zürich: **Modeling and Optimization of Energy Consumption in Multipurpose Batch Plants**, Laufzeit 2004-2008 (SB Projekt 100'536)
- [2] F. Maréchal und Z. Perrin-Levasseur (francois.marechal@epfl.ch), EPF Lausanne: **Efficient Energys Conversion in the Pulp and Paper Industry**, Laufzeit 2005-2008 (JB)
- [3] 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)
- [4] R. Morand (raymond.morand@helbling.ch), Helbling, Zürich: **Gesamtenergiestudie mit der Pinch-Methode – Energie- und Produktionskostensenkung Perlen Papier AG**, Laufzeit 2007 (SB Projekt 102'198)
- [5] B. Wellig (beat.wellig@hslu.ch), CC für Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik, Luzern: **Optimierung Wärmerückgewinnung Batch-Polymerisation Nexis AG**, Laufzeit 2007-2008 (JB)
- [6] L. Sandoval (lisseth.sandoval@fhnw.ch), FHNW, Muttenz: **Effizienzsteigerung von landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen**, Laufzeit 2007-2008 (JB)
- [7] G. Wernet (gregor.wernet@chem.ethz.ch), ETH Zürich: **FINE-CHEM – AN INVENTORY ESTIMATION TOOL FOR FINE CHEMICALS**, Laufzeit 2006-2009 (JB)
- [8] 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)

Solaire actif – Chaleur et Stockage de chaleur

Jean-Christophe Hadorn

jchadorn@baseconsultants.com



Capteurs solaires en couleur

Le défi de réaliser sur une surface importante une couche transmettant plus de 95% du rayonnement solaire au capteur, mais offrant un rendu de couleur (ici bleue) homogène, a été relevé après 4 ans de recherche par l'équipe du Laboratoire d'énergie solaire (LESO) à l'EPF Lausanne. Une ère nouvelle dans l'intégration architecturale d'éléments énergétiques peut s'ouvrir (*photo : LESO EPFL*).

Centres de gravité du programme et buts fixés

Le marché solaire thermique Suisse est en progression très encourageante depuis 2004 (figure 1). En 2006, il y a eu 50'355 m² de capteurs plans vendus en Suisse et 82'440 m² exportés.

35% des surfaces installées concernaient des locatifs (492 cas) pour de l'eau chaude sanitaire,

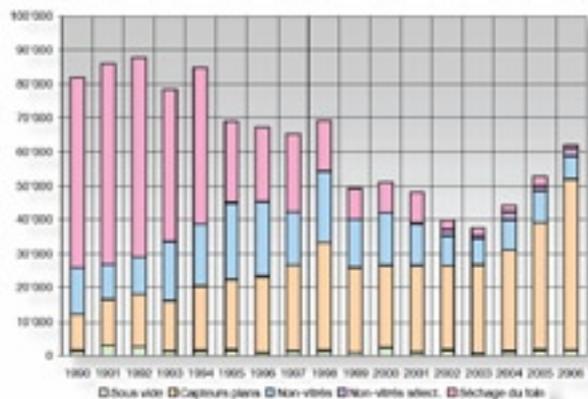


Figure 1 : vente de capteurs solaires thermiques en Suisse de 1990 à 2006, en nombre de m² vendus. (Source : Swissolar, juillet 2007).

25% des surfaces installées en Suisse l'ont été pour des chauffe-eau solaires de villas (2'385 cas), et 19% sont des installations combinées pour villas (1'354 cas). Deux tiers des installations faites ont moins de 10 m² de capteurs et 22% entre 11 et 20 m². Rares ont été les installations de plus de 100 m² (28 cas tout de même).

Pour l'année 2007, nous avons orienté les travaux de R&D – dans le respect du programme pour les années 2004 à 2007 présenté à la CORE [17] – sur les centres de gravité suivants :

- les tests de capteurs en relation avec les fabricants ;
- la mise en fonction d'un simulateur solaire intérieur au SPF (*Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik Rapperswil*) ;
- la recherche sur les systèmes et matériaux pour le stockage de la chaleur solaire pour l'habitat ;
- la réalisation d'un 1^{er} prototype de verre solaire de couleur sur une surface de capteur réel ;
- la sortie de *Polysun 4.0* ;
- les résultats d'optimisation du projet SERSO de dégivrage solaire d'un pont.

Travaux effectués et résultats acquis pour 2007

COMPOSANTS DE LA TECHNIQUE SOLAIRE

Les tests de qualité et de performances des composants solaires au SPF sont un élément important du soutien au développement de bons produits solaires. En 2007, le SPF a réalisé les travaux suivants [1, 2, 3, 4] :

a) Mesure des caractéristiques et test de qualité des capteurs solaires : les installations du SPF ont été utilisées quasiment à toute leur capacité durant l'année.

1. Le nombre d'examen *Solar Keymark*, ainsi que des contrôles de qualité ont augmenté.
2. L'accréditation ISO17025 du SPF comme « organisme de contrôle pour les capteurs solaires thermiques et leurs composants » a été de nouveau confirmée.
3. Le simulateur solaire a pu être mis en service et a été utilisé dans les tests de qualité des capteurs, de sorte que les mesures faites avec le simulateur pourront être accréditées dès 2008.
4. La grêle s'avérant un problème récurrent pour les capteurs à tube sous vide, le SPF a mis au point une nouvelle machine de tests de « grêle » qui donne des effets plus réalistes que ce qui existait auparavant.

5. Le SPF mène une réflexion et des tests sur des « *concept collectors* » pour générer de nouvelles idées de capteurs.
6. Les installations de tests de systèmes de chauffe-eau solaires (4 en parallèle) sur le toit de l'école ont été rénovées totalement et remises en route.
7. Douze systèmes thermosiphons ont pu être testés, dont 8 selon les standards européens. Un seul a été proposé en test au SPF par un fabricant suisse.
8. Un dispositif mobile de tests de systèmes a été mis au point pour un client, élargissant la liste des prestations possibles du SPF.
9. Le banc test de combi-systèmes plus lourd a été utilisé pour une installation combinée solaire et mazout et une installation combinée solaire et pellets. La mise au point du banc pour évaluer les performances et les problèmes de ce type d'installations très prisées en Europe mais très peu testées sérieusement a pu être faite. La mesure de CO, NO, NO_x, SO₂, C_xH_y dans les fumées est également possible. On peut s'attendre à une plus forte demande dans les années à venir pour des tests de combi-systèmes bois-solaire.

10. Le banc de test de pompes a été utilisé pour 4 nouvelles pompes « *rotary vane* », deux avec de l'eau et deux avec un mélange antigel.
11. Le banc de test du comportement de l'eau dans une cuve de stockage à l'aide de la méthode PIV (*Particle Image Velocimetry*) est opérationnel. Deux solutions de sortie de cuve ont été mesurées. Les pertes thermiques peuvent avec des dispositifs simples être nettement réduites grâce à la visualisation des phénomènes en PIV. Les modèles numériques sont moins performants, car dépendant des hypothèses dans des situations difficiles (connections de tubes dans les cuves).
12. Le label de qualité « SOLARGLASS », développé au SPF, s'impose petit à petit en Europe dans les tests de verre solaire par les laboratoires et chez les industriels. Cela est une belle réussite de la ténacité dont le SPF a fait preuve pour imposer la qualité de son test.
13. Plus de 50 verres ont été soumis par des fabricants au SPF pour obtenir ce label, 60% ont passé le test.
14. Quatre couches sélectives nouvelles ont été testées, cependant aucune n'a passé le test du SPF !
15. Le dégazage dans les capteurs est un problème pour nombre de fabricants lors du choix des matériaux, en ce qui regarde l'isolation, la peinture, les colles et les joints. Le SPF a testé 19 capteurs en 2007. Seuls 3 ont réussi le test de qualité, les autres devront être modifiés par le fabricant, s'il le décide.
16. Aucun test de pâte de soudure n'a été demandé durant cette année, le soudage laser devenant la règle chez les fabricants d'absorbeurs en cuivre. Par contre les tests de liaisons entre capteurs, une pièce souvent négligée, mais source de fuites, ont été très demandés après une année sans aucune demande en 2006.
17. Dans le cadre du projet « **Polymeric materials for Solar thermal applications** » du Programme SH&C de l'AIE, le SPF se concentre sur la recherche de polymères adaptés aux capteurs solaires.
18. Dans le cadre du projet « **Solar Air Conditioning and Refrigeration** » du Programme SH&C de l'AIE, la mesure d'une installation de refroidissement solaire installée au SPF montre les difficultés de jeunesse des solutions actuelles. Des améliorations dans les échangeurs sont nécessaires et la modélisation permettra une optimisation bien nécessaire avant le déploiement sur le marché.
19. Après plus d'une année de mise au point, le SPF a déposé un brevet pour un absorbeur entièrement en aluminium qui intéresse déjà des partenaires industriels suisses. Le prix élevé du cuivre motive la recherche de solutions alternatives.
20. Après 20 ans de tests de couvertures transparentes pour les capteurs solaires, dont des échantillons ont été exposés au rayonnement solaire à Davos et à Rapperswil depuis 1986, le projet va se terminer. Les résultats seront prochainement publiés. Ils montrent la non résistance des plastiques chlorés, et la bonne résistance d'autres types de polymères. Dans l'ensemble, le verre a le meilleur comportement malgré tout. Ce travail est unique au monde et utile non seulement pour l'énergie solaire active, mais aussi pour les choix de matériaux de couverture transparents pour atrium, avant-toits et toitures.

b) Matériaux

1. Les travaux du projet « **Polymeric materials for Solar thermal applications** » du Programme SH&C de l'AIE sont accomplis par le SPF en Suisse. Leur but est d'étudier le recours aux polymères dans toutes les parties d'une installation solaire. La protection contre la surchauffe (figure 2) pourrait être assurée par un polymère « thermotrope » qui a la propriété de perdre 50% de transmission dans le visible à 80 °C.
2. Les matériaux dits **thermochromiques** sont aussi une réponse à la surchauffe. Ce peut être l'absorbeur ou la couverture du capteur. Le SPF a défini par simulation les caractéristiques qu'un absorbeur, fait d'un tel matériau, devrait avoir en terme de couple absorption / émission. Pour limiter la température à une valeur de 160 °C, l'émissivité devrait passer de 5 à 25%. Cela paraît possible mais la limite de 100 °C est préférable pour ce qui est du fluide caloporteur. Pour ce faire, le coefficient d'absorption devrait passer de 0.95 à 0.30 ou à 0.60 si l'émissivité peut être augmentée simultanément de 0.05 à 0.95. La recherche de matériaux capable de ces changements a débuté, des pistes existent. Le LESO de l'EPFL, selon les indications du SPF, recherche un nanomatériau susceptible de répondre aux conditions [6]. Les voies de recherche en 2007

concernent les matériaux organiques et inorganiques, et les peintures organiques à propriété thermotropique. Toutefois, les matériaux avec des transitions d'émissivité simultanées à l'absorption ne semblent pas aisés à trouver. Une combinaison de matériaux est la meilleure piste. Une machine à dépôt sous vide a opportunément été donnée au LESO par *Asulab/Swatch* et pourra être utilisée à cet effet. Selon les pistes promises par ces investigations nous déciderons en 2008 de la poursuite.

3. La nouvelle version du **CD-ROM SPF-Info CD** a été préparée. Elle comportera tous les résultats obtenus par le SPF depuis 20 ans. Un gros effort de programmation nouvelle en Java a été fourni, et un accès direct à la base de données des mesures du SPF (pour le calcul du « *Bruttowärmeertrag* » bien connu), avec une interface utilisateur entièrement revue, a été créé. La sortie est prévue pour mars 2008.
4. Le site internet <http://www.solarenergy.ch> continue d'être très fréquenté. Il a été transféré sur une plate-forme Typo3, au standard de la HES de Rapperswil, pour faciliter la gestion quotidienne des droits des usagers et des contenus.
5. Le SPF a développé pour une industrie une méthode de test de vieillissement accéléré d'absorbeurs solaires sous concentration pouvant atteindre 600 °C [26].

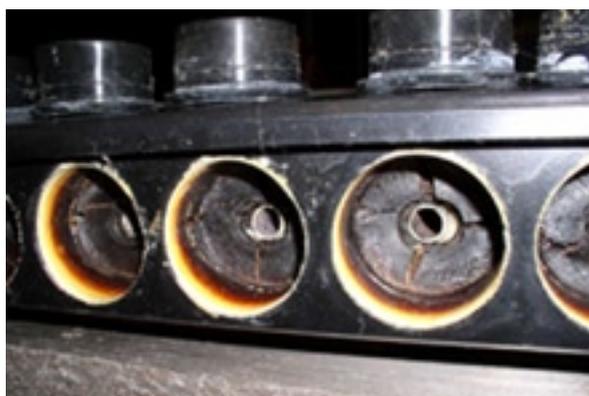


Figure 2 : dommages infligés à l'isolation de capteurs sous vide après qu'ils ont atteint leur température de stagnation.

c) Nouvelles perspectives : des verres solaires de couleur pour capteurs et bâtiments

Le LESO de l'EPF de Lausanne a réussi à produire un verre solaire de couleur de la dimension d'un

capteur solaire thermique [5, 19, 25] (figure 3). Pour aboutir à cette réussite, après 3 années de recherche, les travaux 2007 ont été les suivants :

1. Les couches minces composées de SiO_2 et TiO_2 ont été déposées régulièrement sur des verres de dimension A4 par le procédé sol-gel du LESO.
2. Un traitement aux UV pour durcir le film a été appliqué avec succès pour réduire les temps de production et pour limiter la consommation d'énergie de tout le procédé de dépôt.
3. Les méthodes de mesure optique des propriétés des couches minces déposées au LESO ont été encore affinées.
4. Grâce à une collaboration, pour le moment ponctuelle, avec une société suisse du verre, un dépôt par procédé de pulvérisation « *Magnetron Sputtering* » a pu être réalisé dans leur machine, pour teinter un verre de capteur de 1.90 m par 3 m en bleu. L'opération s'est parfaitement déroulée, et différents types de traitement de surface ont pu être testés avec succès en plus de la couleur, ouvrant ainsi la voie à une possible production de masse si l'industrie y voit un marché.
5. Le procédé par sol-gel pourrait aussi être testé pour des verres de 2 m par 1 m. Il est moins industrialisé, mais il coûterait moins cher en investissement en cas de marché restreint. Des discussions avec une société solaire sont en cours pour monter une unité de production.
6. L'ouverture vers les marchés de la façade solaire a été travaillée en collaboration avec des architectes. Des propositions ont été avancées par le LESO lors du Symposium PLEA à Singapour. Le traitement de surface permettrait des effets intéressants, tels que des textes ou motifs sur le verre à couche de couleur, sans altération des propriétés solaires.
7. Le verre peut être utilisé non seulement pour des capteurs mais aussi en parement extérieur d'isolation de façades, permettant une liberté de couleurs et de rendus appréciée des architectes. Le matériel réalisé a été montré à des architectes et leur réaction recueillie, de telle sorte que des traitements de surface complémentaires à la couleur ont été imaginés et réalisés en prototype. La flexibilité est le critère important si on veut offrir un produit d'intégration.
8. Des contacts approfondis ont eu lieu avec différentes industries du bâtiment et du

verre. Un nouveau projet, soumis à la CTI, sur les nanostructures pour les absorbeurs sélectifs est une retombée du présent projet qui s'annonce très prometteuse.



Figure 3 : durcissement par UV des couches minces déposées sur du verre pour les stabiliser (image de gauche) et coloris obtenus pour diverses combinaisons de couches (image de droite) [5].

d) Étude de la ressource solaire

Le but du projet « **Solar resource Knowledge Management** » [13] du programme *Solar Heating and Cooling* de l'AIE, est de rendre accessibles aux utilisateurs potentiels les données de gisement solaire sous une forme unifiée, précise, complète et simple à utiliser. Ces données peuvent être des archives, des valeurs générées par logiciel, des valeurs en ligne à partir de satellites météorologiques ainsi que des prévisions à court et moyen terme.

La contribution actuelle de l'Université de Genève est d'analyser et d'évaluer le comportement et la précision du logiciel *Meteonorm*. Les principaux résultats obtenus 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 de son utilisation pour des années spécifiques. Par ailleurs, si la répartition dynamique des résultats a été améliorée en comparaison de mesures effectuées à Genève, ce n'est pas le cas lors d'une analyse appliquée à des stations européennes ou américaines.

e) Outils de simulation : **Polysun 4** [4]

La société *Vela Solaris*, créée en janvier 2007 pour mieux installer le logiciel **Polysun** dans les marchés mondiaux, a désormais en charge le *marketing* et certains développements du logiciel, tels que l'intégration de composants de pompes à chaleur et de sondes pour élargir le champ d'application du logiciel. Une autre société, *Solar campus GmbH*, sera chargée plus spécialement de la formation. Cela devrait alléger l'implication du SPF dans la programmation de **Polysun** pour le laisser se consacrer aux aspects scientifiques.

Une nouveauté introduite dans **Polysun 4** en 2007 est un modèle évolué de chaudière à gaz à condensation, à mazout et à granulés, mis au point en collaboration avec un laboratoire de l'Université Technique de Graz en Autriche. Ce développement a été partiellement financé par les fonds de recherche FEV et FOGA des pétroliers et gaziers suisses. **Polysun 4** a également été doté d'un module d'analyse paramétrique pour simplifier les études de variantes, et d'un module de chauffage d'appoint libre (utile pour reproduire les résultats de tests de 12 jours sur les combi-systèmes). Une version, dite **Polysun science**, qui permet une grande liberté de choix à un concepteur de systèmes, tout en gardant la simplicité de simulation, a été développée et est en test au SPF. Pour le bâtiment, **Polysun 4** intègre de manière plus forte qu'auparavant le logiciel **Helios**, utile pour la charge dynamique de chauffage et de refroidissement (figure 4). Une collaboration avec l'EMPA a été utile sur ce thème.

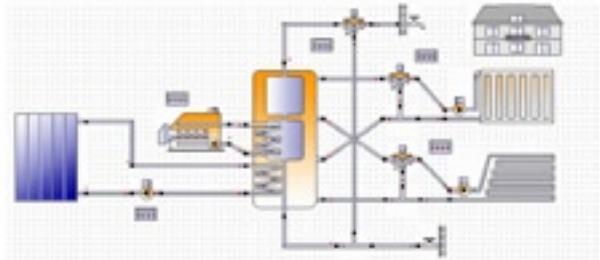


Figure 4 : *Polysun 4* offre encore plus de facilité de conception des circuits de charge ou de décharge tout en permettant de simuler l'installation conçue (source : SPF).

SYSTÈMES ET INSTALLATIONS SOLAIRES POUR LE BÂTIMENT

a) Systèmes combinés : des améliorations possibles [2, 11, 24]

1. Pertes par ponts thermiques : le SPF a mené une étude sur les pertes thermiques par thermocirculation interne dans les raccords à une cuve de stockage (figure 5). Des recommandations constructives ont été édictées qui permettent de concevoir une installation solaire en minimisant les pertes thermiques, non aisément calculables, que sont tous les divers ponts thermiques. La SIA s'est associé à la publication de ces recommandations.

2. Système sans pression [23]

Dans le cadre du projet « **Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings** » du Programme SH&C de l'AIE, le SPF a proposé en 2006 un nouveau système combiné avec des avantages tant économiques

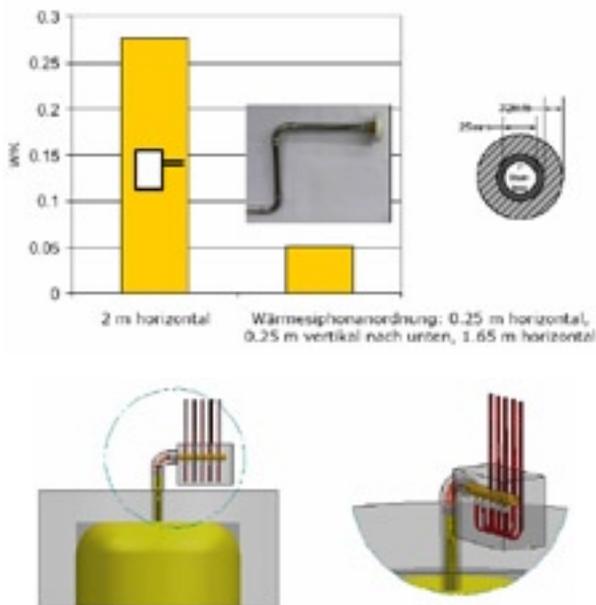


Figure 5 : en disposant la sortie d'une cuve en col de cygne, plutôt qu'horizontale, on peut réduire les déperditions thermiques d'un facteur 5 [24].

qu'énergétiques, le système « maxlean » (figure 6). Il est doté d'une cuve sans pression, d'un débit variable dans la boucle de distribution, et d'un échangeur interne à la cuve pour la préparation d'eau chaude sanitaire.

Les simulations du concept réalisées en 2007 ont montré un avantage du concept pour les fractions d'apport d'énergie solaire comprises surtout entre 20 et 50%. L'avantage peut aller jusqu'à 25% de gain en performance énergétique ; ce qui n'est pas négligeable si la construction est en outre moins onéreuse. Cela reste encore à prouver dans un projet pilote à venir.

STOCKAGE DE CHALEUR

a) Projet SERSO : stockage saisonnier solaire pour le dégivrage d'un pont [7]

L'installation de dégivrage d'un pont dans le Canton de Berne, grâce à un stockage saisonnier à basse température, fonctionne depuis plusieurs années. Sur la base des mesures, un logiciel de simulation, appelé **BridgeSim**, a été développé à la *Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana* (SUPSI). On dispose ainsi d'un outil de simulation performant qui permet des optimisations de tout type pour ce genre d'installations pour le moment encore peu répandue. L'installation de la Suva à Root a bénéficié des développements de ce logiciel [16].

Le logiciel validé **BridgeSim** a été utilisé pour redimensionner le système SERSO. Les grandeurs suivantes ont été optimisées : l'espacement entre les sondes, le contrôle des gains solaires, la longueur des sondes géothermiques et leur pro-

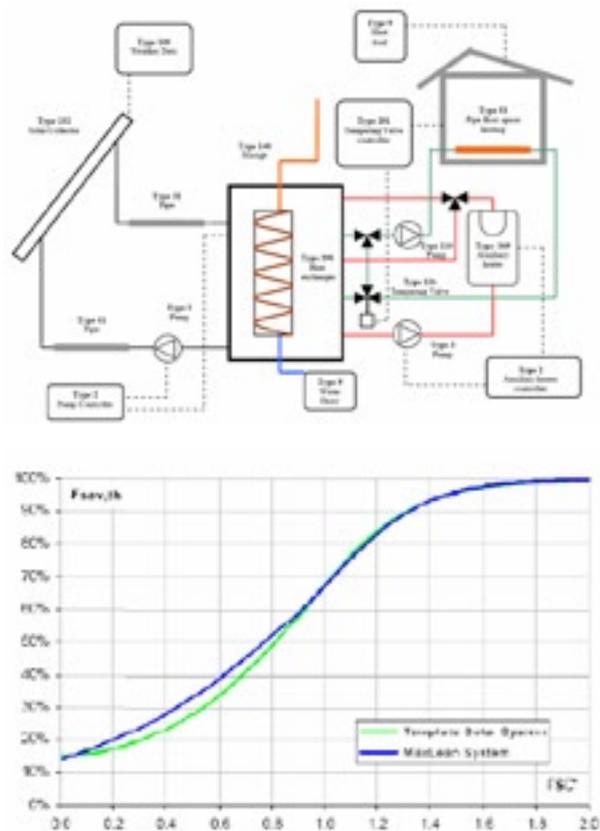


Figure 6 : le système « Maxlean », imaginé par le SPF pour réduire les coûts du solaire, a des performances meilleures que le système de référence du projet « Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings » du Programme SH&C de l'AIE, surtout dans la gamme des faibles taux de couverture solaire [23].

fondeur. Les influences d'autres variables sont également évaluées, comme la résistance thermique des sondes, le diamètre de forage et deux paramètres importants relatifs au pont, qui sont la couche d'isolation sous le pont et l'écartement des tubes dans la chaussée du pont (figure 7). L'isolation de la face inférieure du pont a une influence de premier ordre. Avec une telle isolation, la demande pour le dégivrage est de l'ordre de 100 kWh/(m²-an). L'influence d'un écoulement souterrain au travers du stock peut aussi être évaluée avec le logiciel **BridgeSim**.

L'influence des conditions météorologiques a aussi été chiffrée, des règles simples de dimensionnement sont fournies. Deux paramètres fondamentaux pour le dimensionnement d'un système sont la conductivité thermique du terrain et la quantité d'énergie de chauffage nécessaire au dégivrage du pont. Au-delà d'une certaine énergie spécifique de chauffage, qui se situe entre 150 et 200 kWh/(m²-an), un système comme celui de SERSO ne peut plus satisfaire la demande de chauffage. Pour des valeurs plus basses, la longueur et la profondeur spécifiques des sondes peut varier de 2 m à près de 10 m par m² de sur-

face de pont à dégivrer. Le logiciel sera distribué internationalement, la demande existe aux États-Unis, au Canada et au Japon notamment.

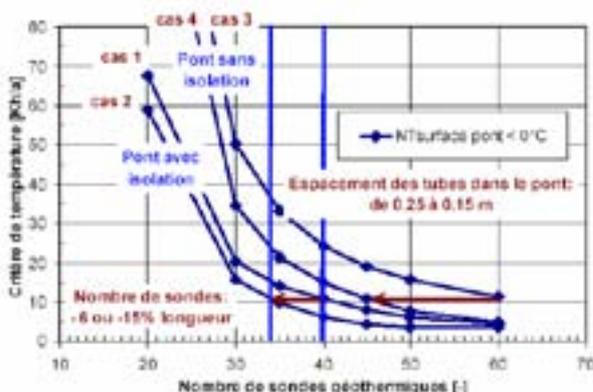


Figure 7 : optimisation a posteriori de SERSO avec le logiciel BridgeSim ; ne pas isoler le pont, tout en maintenant l'espacement des serpentins à 25 cm, nécessite une augmentation massive du nombre ou de la longueur et de la profondeur des sondes géothermiques [7].

b) Stock déphaseur pour le rafraîchissement de locaux [8,18]

Le rapport final du projet « **déphaseur thermique diffusif** » a été publié. L'étude du stockage / déphasage en eau s'est avérée extrêmement concluante, le déphasage de 12 h pouvant être atteint avec un stock de 0.6 m³ par 100 m³/h d'air, ce qui correspond à 40% de réduction par rapport au stockage en ciment ou en terre cuite (figure 8). La transmission du signal se situe parmi les plus hautes valeurs observées jusqu'ici. Ainsi, même pour une vitesse aussi faible que 100 m³/(h·m²), soit 2.8 cm/s à vide, la transmission reste supérieure à 60%.

Globalement, en préliminaire à un développement industriel, le projet a permis de compléter des lacunes scientifiques concernant le phénomène de déphasage thermique contrôlé, de faire le pont avec la mise en place d'un premier projet P&D dans un café de Genève ainsi qu'avec l'étude du potentiel d'intégration dans le bâtiment, et de mettre en place une série de collaborations pour la suite des développements. La solution d'un stock journalier de « frais » dans un système de ventilation nécessiterait d'être développée en collaboration avec l'industrie, dans le but de mettre à disposition un système clé en main. Des collaborations sont toujours recherchées. Des simulations poussées seront poursuivies avec un financement complémentaire du Canton de Genève pour optimiser l'échangeur, et on attend les résultats du projet P&D mis en place dans l'installation rénovée de la ventilation du café genevois et financé par le service de l'énergie du Canton de Genève.

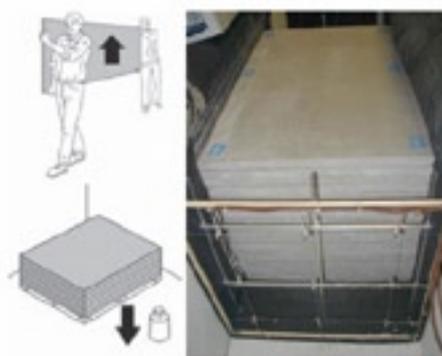


Figure 8 : un déphaseur de 12 h, optimisé par simulation pour un rafraîchissement naturel estival sans appoint et réalisé avec des matériaux traditionnels du bâtiment (plaques de ciment et perlite), a été planifié pour un premier projet P&D à Genève [8].

c) Stockage dense de chaleur pour l'habitat

Le projet « **Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings** » [11a,b] du Programme Solar Heating and Cooling (SH&C) de l'AIE (www.iea-shc.org), que nous avons initié et dirigé depuis 2003, s'est achevé en décembre 2007. Les rapports finaux ne seront terminés que durant les premiers mois de 2008, mais les principales conclusions des travaux des huit pays participants sont les suivantes :

Stockage dans des matériaux à changement de phase (PCM) : les stocks combinés eau + PCM n'ont pas atteint des densités notablement meilleures que celle de l'eau seule dans le cas d'une installation solaire combinée. Néanmoins, les méthodes de caractérisation des PCM ont été nettement améliorées et des modèles de simulation ont été développés qui vont permettre à l'avenir la recherche des meilleures solutions recourant aux PCM. Une solution de stockage saisonnier grâce à un PCM en surfusion a été développée au Danemark.

Stockage dans les cuves à eau : un dispositif en tissu d'amélioration de la stratification a été imaginé et étudié par une équipe danoise. Plusieurs modifications du concept usuel d'installation solaire « combinée » pour une villa, avec stockage en cuve à eau, ont été développées et sont en cours d'étude en Allemagne, en Autriche et en Suisse.

Stockage par sorption : une machine commerciale suédoise produisant 20 kW de chaleur et 10 kW de froid a été mise sur le marché espagnol en 2007. Le stockage en lit perméable de silicagel ou de zéolite n'a pas été couronné de succès. Le matériau est en cause et, pour les températures rencontrées dans l'habitat (20 à 70 °C), de nouveaux matériaux à sorption sont nécessaires. Un nouveau projet a été lancé en ce sens à la fin 2007. Il sera dirigé par une équipe hollandaise. La

zéolite sous forme solide, extrudée avec de petits canaux, est un espoir, et son développement est avancé en Allemagne. En Suisse, les travaux du SPF sur la zéolite ont conclu à une inadéquation du matériau pour le stockage entre 20 et 70 °C. À l'EMPA, on a mis en route une étude de stockage basé sur une adsorption en circuit fermé de l'eau par la soude.

Stockage chimique : il a été conclu que l'une des meilleures réactions chimiques endo- et exothermiques pour le solaire thermique pour l'habitat concerne le sulfate de magnésium heptahydrate entre les deux formes hydratée et non hydratée. Deux groupes de recherche aux Pays-Bas et en France poursuivront la voie. Des modèles de calcul de différents types de stockage ont été développés durant le projet et, pour la plupart, validés. L'équipe de la HEIG-VD d'Yverdon s'est distinguée dans le domaine des matériaux à changement de phase avec un modèle numérique de grande qualité [21]. En ce qui concerne la comparaison de diverses solutions de stockage simulées dans des conditions identiques, dites de référence, les résultats seront disponibles en 2008. La méthodologie de caractérisation d'un système solaire actif a été notoirement améliorée (figure 9) et fera l'objet de publications scientifiques spécifiques. Elle prend en compte désormais la possibilité du stockage de longue durée et du refroidissement solaire.

Stockage par procédé de sorption : Le SPF a poursuivi ses recherches sur un procédé de stockage à long terme par sorption avec de la zéolite 13X (1 à 2 mm de diamètre) [3]. Le dispositif expérimental amélioré en 2007 permet d'étudier les

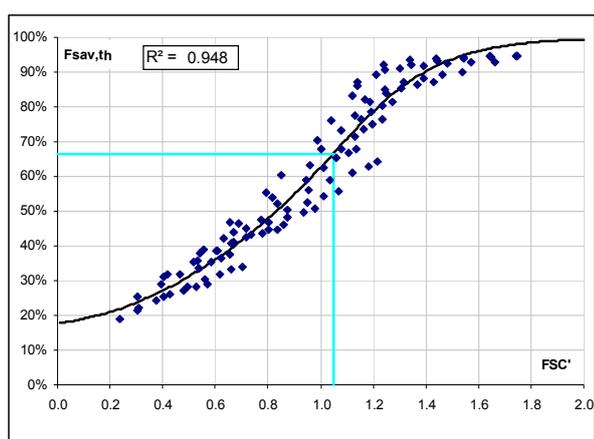


Figure 9 : le concept de la méthode FSC (Fractional Solar Consumption) a été élargi par le projet « Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings » du Programme SH&C de l'AIE [11a,b]. La corrélation entre la valeur FSC et la valeur F_{sav} (Fraction of energy saved by solar) d'une installation combinée peut être déterminée même pour les hautes fractions solaires.

caractéristiques de charge et de décharge d'un lit poreux de zéolite parcouru par un flux de vapeur d'eau. L'étude des paramètres a révélé que le diamètre des particules joue un rôle important dans le phénomène d'adsorption. Il apparaît très difficile d'obtenir avec la zéolite une puissance de charge ou de décharge compatible avec des applications en solaire thermique. L'espoir de ce matériau de fournir un stock plus dense que l'eau a été anéanti de par sa faible capacité de restitution ou de charge. Une équipe autrichienne a testé dans une installation solaire réelle un procédé semblable, mais en utilisant du silicagel. Le résultat a été également décevant, le matériau ne permettant pas une restitution en température suffisante lors de la décharge, malgré des taux de désorption en été assez élevés.

Il a été décidé à la fin 2007 de cesser les travaux dans cet axe de recherche, en gardant une veille technologique sur les matériaux qui peuvent être plus efficaces que la zéolite. Certaines pistes existent au Japon et en Allemagne, mais nous pensons que la voie est trop longue pour un résultat qui ne sera pas très favorable en regard de la capacité calorifique de l'eau pour le stockage à long terme.

Stockage avec matériaux à changement de phase (PCM) [9, 20, 21] : Le rapport final du projet **CosyPCM** de la HEIG-VD d'Yverdon est disponible. Les principaux résultats sont les suivants :

- un modèle numérique de simulation de cuve solaire avec *PCM* (figure 10) est validé sur des mesures ;
- le potentiel d'amélioration procuré par de l'acétate de sodium, matériau à changement de phase autour de 58 °C dans une cuve de combi-système, s'avère faible, surtout dans le cas d'un système combiné à appoint au gaz intégré à la cuve. Ceci est dû au peu de volume à disposition pour le matériau *PCM*, et aux limitations de la vitesse d'échange thermique entre le fluide de la cuve et le matériau à changement de phase. Malgré le mélange avec du graphite et l'ingéniosité déployée dans la construction de l'échangeur, la vitesse réduite du transfert pénalise les systèmes solaires de production d'eau chaude sanitaire ;
- une optimisation de l'usage du matériau à changement de phase dans une installation solaire domestique est à mettre au point, car les premiers résultats sont décevants. C'est l'objet du projet **PowerPCM**.

Le projet **PowerPCM** [10] a pour but de déterminer la relation qui existe entre la puissance fournie par un appoint et les performances d'une installa-

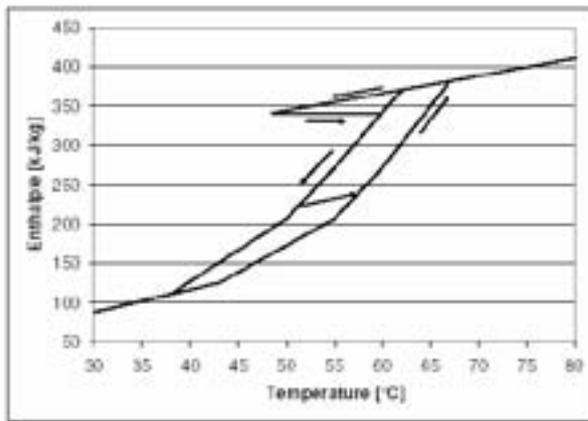


Figure 10 : 2 phénomènes typiques des matériaux à changement de phase qui ont été modélisés : l'hystérèse et la surfusion. (source : LESBAT, HEIG-VD d'Yverdon)

tion solaire, car une puissance trop élevée rend inopérant le stockage dans un matériau à changement de phase qui n'arrive pas à absorber les pointes. À propos de la température de changement de phase, il est montré qu'il y a un optimum aux alentours de 35 °C pour un bâtiment avec une faible demande de 30 kWh/(m².a), alors que pour un bâtiment plus ancien demandant 100 kWh/m².a, l'optimum se situe vers 54 °C. La température de départ de chauffage influence donc directement la température optimale de changement de phase. Mais, dans le meilleur des cas, le gain en performance annuelle avec le PCM, par rapport à un stock en eau, reste faible, à environ 3%. L'optimisation se poursuit pour rechercher les cas les plus favorables au PCM.

Stockage et transport de froid [12, 22] : L'étude expérimentale de coulis d'hydrates de CO₂ est bien avancée. Le groupe de la HEIG-VD d'Yverdon maîtrise la formation de coulis pratiquement à la demande jusqu'à une proportion de 30%, ce qui est élevé. Le pompage demande alors une pression relativement élevée. La mesure de la viscosité s'avère délicate et un banc d'essai a été réalisé pour 2008. La modélisation par CFD (*Computational Fluid Dynamics*) en 2D et 3D est en cours pour prédire la formation d'hydrates et la pression résultante dans un circuit. Une tâche ardue qui pourra ouvrir la voie à l'optimisation du transport et du stockage de froid dans des machines *ad hoc*. Le marché est grand et la coopération avec l'industrie va être recherchée.

Stockage thermochimique : Dans le projet « NaOH » [14], l'EMPA essaie de réaliser un stockage plus dense en volume que l'eau. Les tra-

voux théoriques ont montré qu'un facteur 3 était possible, par rapport à un stock d'eau à 70 °C. Le dispositif expérimental monté en 2006 a été exploité pour les premiers essais. Des difficultés de pompage, dues à la viscosité, et de corrosion ont été surmontées. Un modèle mathématique du comportement global du stock a été écrit. La simulation de l'installation est en cours sur un système de référence du projet « *Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings* » du Programme SH&C de l'AIE.

d) Réfrigération solaire

Le sujet est de plus en plus à l'étude en Europe, avec des visées sur les marchés méditerranéens. Au SPF, une installation test comporte 30 m² de capteurs et une machine à **adsorption** Phönix au LiBr – H₂O de 10 kW, qui procure du froid à un atelier par le biais de 80 m² de panneaux radiants. Les pompes auxiliaires consomment 1.5 kW. Il a été mesuré un coefficient de performance thermique (COP) de 0.8 et, en tenant compte des auxiliaires électriques, un COP global de 0.68. L'analyse économique montre des coûts annuels de 10'000 CHF contre 2'000 CHF pour un système à compression équivalent tout électrique [3]. D'autres travaux, concernant une armoire réfrigérée solaire par un système à ammoniac nécessitant une source à 260 °C, ont été réalisés pour mieux comprendre les phénomènes et pour développer des modèles de composants dans l'outil de simulation **Polysun**.

Au Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment (LESBAT) de la HEIG-VD d'Yverdon, on travaille également sur un système à **adsorption**. Les travaux ont porté sur la finalisation du principe du banc d'essais à installer en 2008, l'acquisition de la machine à adsorption de marque *Sortech*, et la conception de l'installation de cette machine sur le stand avec l'intégration de simulations TRNSYS dans la boucle de commande et d'acquisition [15]. Le développement d'une nouvelle machine de froid n'est pas envisagé. Le travail vise à coupler un système solaire combiné existant avec une production de froid en été, et à optimiser ce couplage pour comprendre son intérêt énergétique et économique. Le LESBAT utilise également ses compétences en analyse environnementale de l'installation de climatisation solaire à adsorption pour la comparer à une installation standard de climatisation, en utilisant le logiciel **Ecobat** de la HEIG-VD d'Yverdon qui pourrait ainsi devenir un standard international.

Collaboration nationale

Le SPF/HS-Rapperswil travaille avec pratiquement tous les fabricants de capteurs solaires suisses.

Les centres de compétences suisses que nous soutenons (SPF/HS-Rapperswil, LESBAT/HEIG-VD, CUEPE/Uni GE, LESO/EPFL, LEEE/SUPSI) collaborent avec des industriels nationaux dans leurs projets.

Le LESO/EPFL travaille entre autres avec l'Université de Bâle sur la question des nanocouches de couleur, et a approché six industriels pour ancrer le projet dans les besoins du marché et trouver des solutions industrielles à la production de verre solaire.

Collaboration internationale

Le SPF collabore à trois projets du Programme SH&C de l'AIE : le projet « **Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings** », le projet « **Solar Air Conditioning and Refrigeration** » et le projet « **Polymeric materials for Solar thermal applications** ». Le SPF/HS-Rapperswil collabore régulièrement avec l'*Institut für Solare Energiesysteme ISE*, à Freiburg-i.-B. (DE) et le *SP Technical Research Institute of Sweden*, à Borås (SE).

Le SPF/HS-Rapperswil est présent dans les grandes conférences scientifiques et techniques solaires européennes pour présenter ses travaux et

promouvoir **Polysun**. Des collaborations naissent à cette occasion ainsi que des idées de partenariat pour des projets européens.

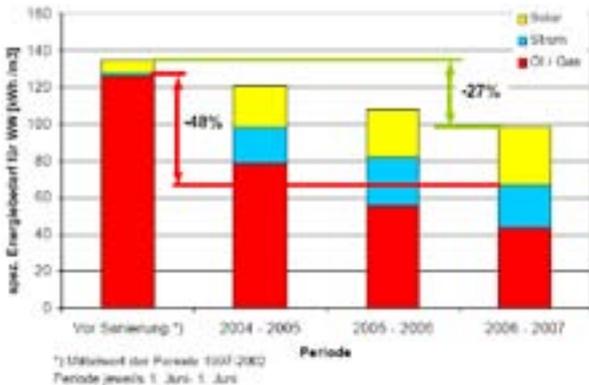
Dans le projet « **Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings** » que nous avons dirigé durant 5 ans, les échanges entre partenaires internationaux ont permis à nos équipes de progresser beaucoup plus vite dans certaines connaissances.

Le LESO/EPFL est à l'origine d'un nouveau réseau européen sur les films minces nanostructurés qui est en passe de voir le jour, suite à une conférence très suivie, tenue en 2007 à Gdansk (PL).

Projets pilotes et de démonstration «Solaire actif – chaleur»

Im Jahre 2007 wurden mangels Budget keine neuen Pilotprojekte mehr gestartet. Eines der bei-

den verbleibenden Projekte [100] konnte abgeschlossen werden, das andere [101] erfährt wegen zögerlicher Inangriffnahme der Betriebsoptimierung weitere Verzögerungen.



Figur 11: Veränderung des spezifischen Energiebedarfs der Warmwassererzeugung vor und während der etappenweisen Sanierung der Gebäude der Gemeinnützigen Baugenossenschaft Zürich GBZ.

Die Sanierung der Gebäude der Gemeinnützigen Baugenossenschaft Zürich (GBZ) [100] an der Drusbergstrasse in Zürich zeigt, wie dank kontinuierlicher Ausrüstung aller Gebäude mittels Solaranlagen, der Primärenergieaufwand für die Warmwasserversorgung deutlich gesenkt werden kann (Figur 11). Dabei ist die Systemarchitektur der Warmwasserversorgung für die Wahl der optimalen Einbindung von grosser Bedeutung. Dank dezentraler Wassererwärmer, mit lokaler Sonnenenergieanbindung lassen sich die Verteilverluste von der Heizzentrale zu den einzelnen Gebäuden stark reduzieren.

Évaluation de l'année 2007 et perspectives pour 2008

Les travaux de tests de qualité des composants solaires se déroulent à satisfaction au SPF et stimulent aussi la recherche. Le simulateur solaire a été mis en route et sera un outil important pour intensifier les essais sans dépendre de la météorologie.

La réalisation d'un prototype de verre solaire de couleur, adapté à un capteur réel, est une grande première. Les discussions pour une industrialisation doivent s'intensifier durant 2008. La reconnaissance d'un marché, non seulement solaire, mais aussi architectural, et d'une technologie

procurant un avantage compétitif à un industriel, est la phase à privilégier. La connaissance sur les nanomatériaux et la compétence que le LESO a patiemment construites depuis 2001 avec le soutien de notre programme portera ses fruits non seulement dans le domaine des capteurs en couleur, mais aussi peut-être dans la thermochromie et les couches sélectives.

M. Schueler du LESO a été récompensé en 2007 par le prix de l'article scientifique le plus téléchargé en 2005 et 2006 sur le site du prestigieux « *Solar Energy Journal* ». La publication date de 2004 et a été réalisée avec le Prof. Oelhafen de Bâle, un des meilleurs connaisseurs mondiaux des nanostructures à propriété optique. Le prix leur a été distribué lors d'une conférence internationale à Pékin [25].

Le logiciel *Polysun 4.0* a été techniquement bien repris par l'entreprise *Vela Solaris*. Il a encore progressé, mais les conditions de survie financière de cette *spin-off* ne sont pas encore garanties. En 2008, un premier module de réfrigération solaire, basé sur l'expérience des mesures au SPF, sera introduit sur le marché. Dans les années à venir, nous souhaitons que *Polysun* devienne aussi

LA référence mondiale dans le domaine du froid solaire. La validation des modèles de chaudière d'appoint est à faire en 2008 en utilisant les résultats des tests de combi-systèmes sur le banc du SPF.

Le projet SERSO d'un pont dégivré par l'énergie solaire s'est achevé après près de 10 ans de travaux : le projet a été réalisé, les mesures effectuées, un modèle de calcul validé, une optimisation *a posteriori* a été faite en simulation dynamique et un logiciel, *BridgeSim*, est désormais disponible. La commercialisation de cet outil est prévue pour 2008.

Les travaux ayant pour objet la recherche de nouveaux matériaux pour le stockage ont été plus difficiles que prévu. Les efforts financiers consentis ne sont pas à la hauteur du problème. La recherche internationale commence, grâce à nos efforts depuis 2001, mais timidement, à se mobiliser sur le sujet. Nous concentrons nos ressources sur les thèmes qui nous paraissent à notre portée.

Selon la demande de la CORE, nous orientons désormais notre programme un peu plus vers la réfrigération solaire, avec deux projets qui ont débuté en 2007.

Liste des projets de R+D

(RA / RI) Rapport annuel / intermédiaire 2007 existant

(RF) Rapport final existant (voir www.recherche-energetique.ch sous les numéros de projet entre parenthèses)

Les rapports peuvent être téléchargés à partir de notre site : <http://www.solarenergy-thermal.ch/> ou www.solarch.ch

Solaire actif – chaleur

- [1] A. Bohren, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ♦ **Teil A: Komponenten in solarthermischen Systemen** (RA) <http://www.solarenergy.ch/>
- [2] E. Frank, S. Laipple, L. Konersmann, R. Haberl, P. Gantenbein, S. Brunold, P. Vogelsanger, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ♦ **Teil B: thermische Solarsysteme** (RA) <http://www.solarenergy.ch/>
- [3] S. Brunold, F. Flückiger, P. Gantenbein, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ♦ **Teil C: Materialien & Komponenten in solarthermischen Systemen** (RA) <http://www.solarenergy.ch/>
- [4] G. Necola, H. Marty, S. Brunold, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ♦ **Teil D: Informatik** (RA) <http://www.solarenergy.ch/>
- [5] A. Schüler, C. Roecker, E. de Chambrier, MC Munari-Probst, LESO EPFL, Lausanne: **Colored solar collectors – Phase II: From laboratory samples to collector prototypes** (RF du projet 100'506) <http://leso.epfl.ch/>
- [6] G. Huot, C. Roecker, A. Schüler, LESO EPFL, Lausanne: **Evaluation of the Potential of Optical Switching Materials for Overheating Protection of Thermal Solar Collectors** (RF du projet 102'016) <http://leso.epfl.ch/>

Stockage de chaleur

- [7] D. Pahud, SUPSI-DCT-LEEE, Canobbio: **SERSO, stockage saisonnier de l'énergie solaire pour le dégivrage d'un pont** (RF du projet 27'006) <http://www.lee.ee.supsi.ch/>
- [8] P. Hollmuller, B. Lachal, CUEPE Uni GE, Genève: **Déphaseur thermique – Optimisation et prototype intégré** (RF du projet 45'914) <http://www.cuepe.ch>
- [9] S. Citherlet, J. Bony, LESBAT, HEIG-VD, Yverdon: **CoSyPCM – Combi-système avec matériaux à changement de phase** (RF du projet 100'522) <http://www.heig.ch>
- [10] S. Citherlet, J. Bony, LESBAT, HEIG-VD, Yverdon: **POWER PCM** (RA) <http://www.heig.ch>
- [11] J.-C. Hadorn, BASE consultants SA, Lausanne: (a) **IEA SH&C Task 32 Advanced storage concepts for solar and low energy buildings – Annual report of the operating agent** (RA) • (b) **IEA SH&C Task 32 Advanced storage concepts for solar and low energy buildings – Feature article in SH&C** (RA) <http://www.iea-shc.org>
- [12] O. Sari, J. Hu, F. Brun, N. Erbeau, IGT, HEIG-VD, Yverdon: **Projet Transport et Stockage de froid, I Experimental work, II Conversion Model-Determination of Solid Fraction** (RF du projet 101'582, confidentiel)
- [13] P. Ineichen, CUEPE UNI GE, Genève: **Solar resource management IEA SH&C Task 36** (RA)
- [14] R. Weber, EMPA : **NAOH-Speicher für saisonale Wärmespeicherung** (RA)
- [15] S. Citherlet, C. Hildbrand, LESBAT, HEIG-VD, Yverdon: **SOLCOOL – Climatisation et chauffage par combisystème** (RA)

Liste des projets P+D « Stockage de chaleur »

- [16] P. Berchtold, E. Wirz, B. Engsig, M. Frei, PB Büro, Sarnen: **Geothermiespeicher SUVA D4 Unternehmens- und Innovationszentrum, Root (LU)** (RA) <http://www.aramis-research.ch/e/14779.html>

Références

- [17] J.-C. Hadorn: **Points clés du programme « Solaire actif chaleur et stockage de chaleur »** (Document de synthèse pour le programme 2008-2011, révision novembre 2007)
- [18] P. Hollmuller, B. Lachal, J.-M. Zraggen, CUEPE Uni GE, Genève: **Phase-shifted ventilation, a new thermal storage concept for passive cooling of buildings: theoretical and experimental characterization**, International Journal of Heat and Mass Transfer, submitted November 14, 2007, <http://www.cuepe.ch>
- [19] M.-C. Munari Probst, C. Roecker, LESO, EPFL, Lausanne: **From façade integration of solar thermal collectors to active façade system – new glazed solar collectors for façades : The LESO solar coloured glazing project**. 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, PLEA 2007, Singapour
- [20] J. Bony, S. Citherlet, LESBAT, HEIG-VD, Yverdon: **Comparison between a new TRNSYS model and experimental data of phase change materials in a solar combisystem**, Building simulation 2007, 371-378
- [21] J. Bony, S. Citherlet, LESBAT, HEIG-VD, Yverdon: **Numerical model and experimental validation of heat storage with phase change materials**, Energy and Buildings 39 (2007), 1065-1073 www.sciencedirect.com
- [22] O. Sari, IGT, HEIG-VD, Yverdon: **CO₂ slurry – Production and distribution**, Swissforum technology 2007
- [23] R. Haberl, P. Vogelsanger, SPF/HS-Rapperswil: **Simulation and Optimization of the Maxlean System**, IEA SH&C Task 32, Sept. 2007, <http://www.iea-shc.org> (Task 32, Subtask D)
- [24] SPF/HS-Rapperswil: **Wärmeverluste durch Gegenstromzirkulation (rohrinterne Zirkulation) in an Speicher angeschlossenen Rohrleitungen**, SPF - SIA, Okt. 2007, <http://www.solarenergy.ch/>
- [25] P. Oelhafen, A. Schüler, **Nanostructured materials for solar energy conversion**, Solar Energy 79 (2), 110-121, Best Full Length Paper in Energy Conversion, ISES World Congress 2007, Beijing, China
- [26] S. Brunold, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: **Beschleunigte Alterungsprüfung an Solarabsorbern für den Einsatz im Mitteltemperaturbereich** (RA)

Liste des projets P+D « Solaire actif : chaleur »

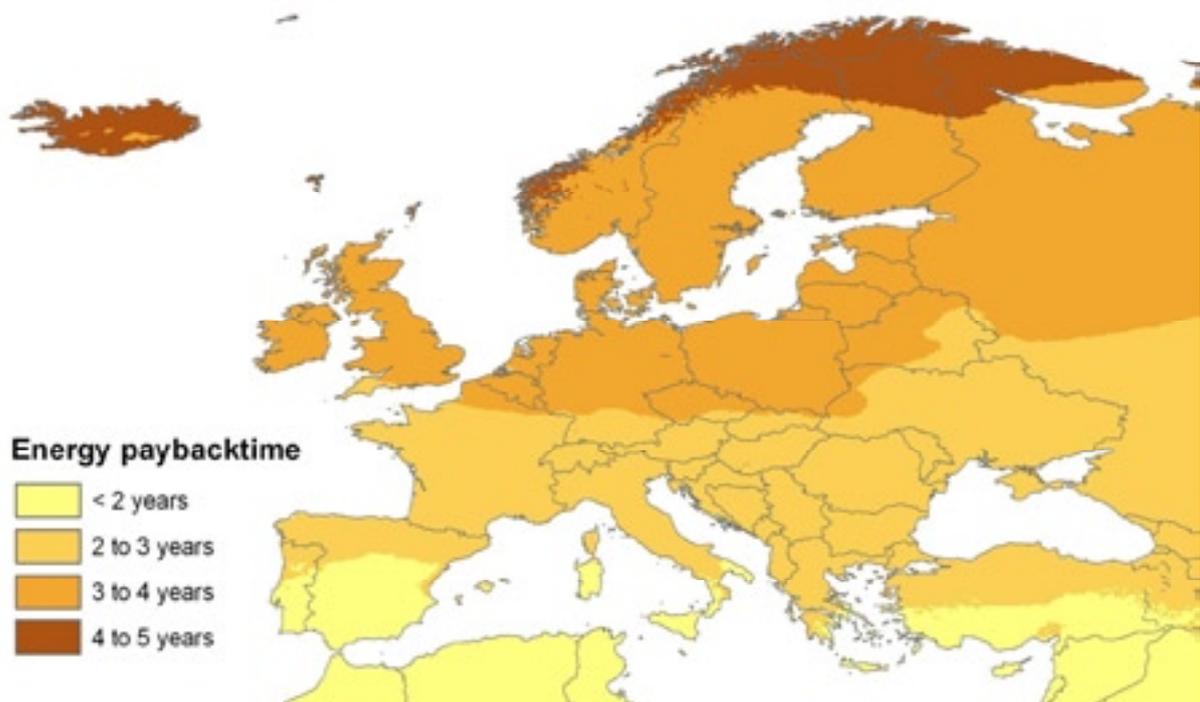
NB : La numérotation commence à 100.

- [100] A. Primas (aprimas@bhz.ch), BASLER & HOFMANN AG, Zürich: **Sanierung der Warmwasserversorgung Gemeinnützige Baugenossenschaft Zürich 7 (GBZ 7)** (RF du projet 100'171)
- [101] T. Bruttin (thierry.bruttin@sierre.ch), VILLE DE SIERRE: **Complexe sportif Guillamo** (RA)

PROGRAMM PHOTOVOLTAIK

Stefan Nowak

stefan.nowak@netenergy.ch



Energierücklaufzeit der Photovoltaik – eine häufig wiederkehrende Frage

Im Rahmen der Überarbeitung der Ecoinvent-Datenbank wurde die Energierücklaufzeit der Photovoltaik anhand von aktuellen industriellen Prozessen und Produkten ermittelt. Obige Darstellung zeigt die Energierücklaufzeit einer multikristallinen 3-kWp-Schrägdachanlage in Europa mit dem UCTE-Elektrizitätsmix als Referenz (*Bildquelle: ESU Services*).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Photovoltaik erfuhr im Jahr 2007 weltweit wie auch in der Schweiz einen weiteren Aufschwung. Davon war auch das Programm Photovoltaik massgeblich betroffen, indem immer mehr vor allem auch industrielle Akteure sich mit der Photovoltaik auseinandersetzen, Ideen und Konzepte formulieren und Projekte entwickeln. Durch die anfangs des Jahres durch das Parlament beschlossene Einführung der kostendeckenden Vergütung für Strom aus erneuerbaren Energien erhielten anwendungsorientierte Fragestellungen an zusätzlicher Bedeutung. Durch die breite Programmastützung im Bereich der Forschung konnte das bisherige Niveau gehalten werden. Das anhaltende Wachstum des internationalen Photovoltaik Marktes bildet eine wichtige Grundlage für den weiterhin erfolgenden, deutlichen Ausbau der Photovoltaik Industriebasis in der Schweiz.

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 2007 ca. 55 Projekte, wobei alle bekannten Projekte mit einer Förderung der öffentlichen Hand berücksichtigt sind.

Gestützt auf das Energieforschungskonzept der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE [40] verfolgt das Schweizer Photovoltaik Programm in der Periode 2004 – 2007 die folgenden wesentlichen Ziele [41]:

- Es soll eine weitere Kostenreduktion (\neq Preise) des Energiesystems Photovoltaik erreicht werden (typische Werte 2007: Modul 2.5 CHF/Wp; System 5 CHF/Wp) und entsprechende Verbesserungen der einzelnen Komponenten in Bezug auf elektrische Eigenschaften (2007: Dünnschichtmodule mit $>12\%$ Wirkungsgrad), Herstellungskosten und industrielle Fertigung;
- Etablierung bzw. Konsolidierung der industriellen Basis für Produkte der Photovoltaik, einschliesslich Solarzellen und Module in ausgewählten Technologieansätzen;
- Hohe Integration und Standardisierung der Produkte und Systeme für Massenmärkte.

Dazu ist das Programm Photovoltaik in folgende Bereiche aufgeteilt:

SOLARZELLEN DER ZUKUNFT

Die Arbeiten zu **Dünnschicht Solarzellen** waren im Berichtsjahr wie bisher fokussiert auf die Schwerpunkte **Silizium** (amorph, mikrokristallin), Zellen auf der Basis von **Verbindungshalbleitern** (CIGS) sowie **Farbstoffzellen**. **Neue Konzepte**

(Materialien und Prozesse), z.B. organische und Polymersolarzellen, für langfristige Technologieoptionen gewinnen in der Grundlagenforschung gesamthaft an Bedeutung und bewegen sich gleichzeitig vom Konzept zur Solarzelle. Die mit Nachdruck verfolgte Industrialisierung von Produktionsprozessen steht bei den Silizium Dünnschicht Solarzellen in einem fortgeschrittenen Stadium, bei den Verbindungshalbleitern ist ein industrielles Projekt im Aufbau. Im Jahr 2007 wurden erstmals in der Schweiz konkrete grössere Fertigungsanlagen mit Dünnschicht Solarzellen angekündigt. Solarzellen auf flexiblen Substraten gewinnen zudem weiterhin an Bedeutung.

MODULE UND GEBÄUDEINTEGRATION

Die **Integration der Photovoltaik** im bebauten Raum bildet weiterhin den wichtigsten Schwerpunkt der angestrebten Anwendungen. Während dem der Markt für Montagesysteme mittlerweile eine breite Produktpalette anbieten kann, stellen neue Produkte und Erfahrungen mit Dünnschicht Solarzellen in der Gebäudeintegration weiterhin ein wachsendes Thema dar.

ELEKTRISCHE SYSTEMTECHNIK

Die **Qualitätssicherung** von Photovoltaikmodulen, von Wechselrichtern und von gesamten Systemen ist, zusammen mit **Langzeitbeobachtungen** an diesen Komponenten, für die Praxis von anhaltender Bedeutung und wird in entsprechenden Kompetenzzentren an Fachhochschulen bearbeitet. Langjährige Messreihen und die vermehrte Analyse von Fehlverhalten der einzelnen Komponenten sollen in Hinsicht auf kritische Parameter und die Erhöhung der Lebensdauer genutzt werden. Aufgrund dieser systembezogenen Arbeiten soll die spezifische Energieproduktion von Photovoltaik-Anlagen (kWh/kWp) weiter erhöht werden. Für **Insulanlagen** wächst die Bedeutung der Kombination mit anderen Energietechnologien in Hybridanlagen.

ERGÄNZENDE PROJEKTE UND STUDIEN

Die Arbeiten in diesem Bereich sollen die Grundlagen zu allgemeinen Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Marktaufbau der Photovoltaik liefern, insbesondere zu **Potenzial, Umweltaspekten** und **Energieplanung** sowie praxisorientierten **Hilfsmitteln** zur Anlagenplanung und -überwachung. Neuste Technologien des Internets, Computermodelle, Bildverarbeitung, geografische Informationssysteme bis hin zur Satellitenkommunikation gelangen dabei zum Einsatz. Für Anwendungen in **Entwicklungsländern** stehen dagegen nicht-technische Aspekte im Vordergrund. Dieser Bereich des Programms umfasst zudem die Vorhaben an den Schnittstellen zu anderen Energietechnologien.

INSTITUTIONELLE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT

Die internationale Zusammenarbeit bildet ein zentrales Standbein in allen Bereichen. Der Anschluss an die internationale Entwicklung sowie ein intensiver Informationsaustausch war im Berichtsjahr ein wichtiges Ziel, welches im Rahmen der internationalen Programme der EU sowie der IEA mit Kontinuität weiterverfolgt wurde. Die erfolgreiche internationale Zusammenarbeit

konnte in einigen der grossen EU-Projekte (*Integrated Projects*) fortgesetzt werden. Von übergeordneter Bedeutung war im Berichtsjahr zudem die Schweizer Beteiligung an den Arbeiten in europäischen Netzwerken (**PV-ERA-NET** und **Europäische Photovoltaik Technologie Plattform**). Dabei ist die Publikation der *Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology* [42] der Europäische Photovoltaik Technologie Plattform besonders hervorzuheben.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

ZELL-TECHNOLOGIE

Die **grosse Bandbreite der Schweizer Solarzellenforschung** konnte im Berichtsjahr 2007 dank der breiten Abstützung dieser Forschung mit Erfolg fortgesetzt werden. Die Beteiligung an EU-Projekten des 6. Rahmenforschungsprogramms sowie KTI-Projekte bildeten hier gewichtige Elemente. Die Schweiz ist mittlerweile an den meisten laufenden *Integrierten Projekten* der Europäischen Kommission im Bereich der Photovoltaik direkt oder indirekt beteiligt.

a) Dünnschicht Silizium

Die Entwicklungen im Bereich des Dünnschicht-Siliziums finden am Institut de Microtechnique (IMT) der Universität Neuchâtel, am Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP) der EPFL, an der Haute Ecole Arc ingénierie (Le Locle), an der Interstaatlichen Hochschule für Technik Buchs (NTB) sowie bei den Unternehmen *oerlikon solar* (Trübbach und Neuchâtel) und *VHF-Technologies* (Yverdon) statt und stellen den wichtigsten Schwerpunkt des Photovoltaik Programms dar.

Das IMT an der Universität Neuchâtel schloss im Berichtsjahr die aktuelle Phase des Projektes zu **Silizium Dünnschicht Solarzellen** [1a] ab. Die Ziele dieses BFE-Projektes bestanden darin, den Wirkungsgrad der Solarzellen auf verschiedenen Substraten weiter zu erhöhen (Ziel 14% für mikromorphe Solarzellen), die Prozessführung und Charakterisierung der Solarzellen weiter zu entwickeln und die notwendige Infrastruktur (Prozesse, Herstellung und Charakterisierung) zur Unterstützung der Industriepartner sicherzustellen. Dazu wurden verschiedene Depositionssysteme erneuert und automatisiert, die Systeme zur Charakterisierung der Solarzellen standardisiert und ein spezieller Akzent auf die Reproduzierbarkeit der einzelnen Fabrikationsschritte gelegt. Die Zusammenarbeit mit der Industrie erfolgte primär mit den Unternehmen *oerlikon solar* und *VHF-Technologies*, welche ihrerseits die am IMT entwickelten Prozesse in ihre Produkte implementieren. Folgende Resultate wurden im Berichtsjahr erreicht: Aufbauend auf den Resultaten der Vorjahre für

amorphe und mikrokristalline Einfach-Solarzellen (*single junction*) auf Glassubstraten und der Entwicklung von Zwischenreflektor-Schichten wurde eine weitere Erhöhung des Wirkungsgrads der mikromorphen Solarzelle angestrebt. Nachdem die Zwischenreflektor Schicht bisher auf ZnO aufgebaut war, wurde im Berichtsjahr dazu intensiv mit SiO_x Schichten gearbeitet. Mit diesem Material wurde im Berichtsjahr für mikromorphe Solarzellen von 1.2 cm² Fläche ein Anfangswirkungsgrad von 12.6% erreicht. Auf Kunststoffsubstraten wurden sowohl amorphe wie mikrokristalline Solarzellen hoher Qualität hergestellt. Mikrokristalline Solarzellen auf PET (Polyethylenterephthalat) bzw. PEN (Polyethylennaphtalat) erreichten einen Wirkungsgrad von 8.6%. Das physikalische Verständnis der optoelektronischen Eigenschaften von ZnO, insbesondere der Einfluss der Korngrößen des Materials auf die Mobilität der Ladungsträger, konnte verbessert werden. Ein neues, automatisiertes Doppelkammer-Depositionssystem konnte erfolgreich in Betrieb genommen werden (Fig. 1).

Ein neues KTI-Projekt **Flexible Photovoltaics – next generation high efficiency and low cost thin film silicon modules** [1b] hat im Berichtsjahr zwischen dem IMT der Universität Neuchâtel und *VHF-Technologies* begonnen. 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 Einführung eines rückseitigen, diffus streuenden Reflektors und einer amorphen Zellenstruktur in Tandemkonfiguration soll der Wirkungsgrad der industriellen Produkte auf 6% erhöht werden. Es wurden auf kleiner Fläche erste vielversprechende Ergebnisse mit einem Wirkungsgrad von 8.8% erreicht.

In einem neuen, durch den *Axpo Naturstrom Fonds* unterstützten Projekt **THIFIC – Thin film on crystalline silicon** [1c] werden am IMT ultra hocheffiziente Solarzellen von 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 Vorteil liegt in der Verwendung von Siliziumwafern deutlich geringerer Dicke bis gegen 100 μm und entsprechender Material- bzw. Energieeinsparung. In Vorarbeiten zu diesem Vorhaben wurde bereits ein Wirkungsgrad von 19% erreicht. Nun geht es darum, mit texturierten Wafern noch bessere Resultate zu erzielen.

Das IMT und *VHF-Technologies* arbeiten, zusammen mit weiteren Partnern aus Europa, im EU-Projekt **FLEXCELLENCE** [1d] am Thema der flexiblen Solarzellen auf Kunststoff- und Metallsubstraten, wobei die Gesamtkoordination des Projektes durch das IMT erfolgt. Im Berichtsjahr konnten nanotexturierte Substrate auf Metall- und Plastikfolien hergestellt werden. Im Vorhaben werden 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 auf Kunststoff mit einem Wirkungsgrad von 10.9% realisiert. Auf dieser Grundlage könnten bei einem Wirkungsgrad von 10% in der industriellen Fertigung tiefe Kosten von $< 0.6 \text{ €/Wp}$ erzielt werden.

Im Integrierten EU-Projekt **ATHLET** [1e] befassen sich das IMT und *oerlikon solar* mit der Weiterentwicklung der Dünnschicht Silizium Solarzellen. Für mikromorphe Tandemzellen lautet das Ziel 10% stabiler Wirkungsgrad bei einer Fläche von 1 m^2 und 10 \AA/s Depositionsrate bzw. Modulproduktionskosten von $< 0.5 \text{ €/Wp}$. Dieses Projekt ergänzt das eingangs aufgeführte BFE Projekt am IMT. Im KAI-S Reaktor konnte im Berichtsjahr ein Anfangswirkungsgrad von 10.5% erzielt werden. *oerlikon solar* demonstrierte an der 22. europäischen Photovoltaik Konferenz in Mailand erste grossflächige (1.3 x 1.4 m^2) mikromorphe Module mit einem Wirkungsgrad von 9.46%.



Figur 1: Automatisiertes Dünnschichtsilizium-Doppelkammer-Depositionssystem auf der Grundlage der KAI-M plasma box von oerlikon (Bildquelle: IMT)



Figur 2: MRC Sputteranlage zur Abscheidung der Front- und Rückkontakte in 30 x 30 cm^2 CIGS Dünnschicht Solarzellen (Bildquelle: ETHZ)

b) Kristallines Silizium

Im KTI-Projekt **SIWIS** [2] erarbeitet die EMPA Thun in Zusammenarbeit mit *Applied Materials Switzerland* (vormals *HCT Shaping Systems*) die Mechanismen, welche bei Drahtsägen von dünnen Silizium Waferscheiben zu Oberflächendefekten führen können, um daraus entsprechende Modelle zu entwickeln. Übergeordnetes Ziel des Vorhabens ist die Herstellung von Wafern unter 100 μm Dicke für die Produktion von kristallinen Siliziumsolarzellen. In Funktion der Sägeparameter konnte eine Korrelation zwischen der Oberflächenrauheit und der Bildung von Spalten bzw. der mechanischen Festigkeit festgestellt werden. Trotz Abschluss des Vorhabens als KTI-Projekt soll die Zusammenarbeit fortgesetzt werden.

In einer neuen KTI-Machbarkeitsstudie **SIRE** [3] untersucht die Fachhochschule Genf zusammen mit *Applied Materials Switzerland* die Möglichkeiten zum Recycling von Silizium aus Sägeabfällen. Es konnte gezeigt werden, dass das Silizium vom Siliziumkarbid getrennt werden kann.

Das von *Applied Materials Switzerland* verfolgte EU-Projekt **BITHINK** [4] wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Die Waferdicke konnte dabei auf von 280 auf 90 μm reduziert werden. Dies führt zu einer Anzahl Wafer pro Meter festes Silizium von rund 3500, bzw. 1.45 m^2 Silizium Wafer pro kg Silizium. In einer bifacialen Solarzelle führt dies bei 13% Wirkungsgrad zu einem Siliziumverbrauch von 3.9 – 4.6 g/Wp . Kann der Wirkungsgrad auf 15% erhöht werden, so sind Werte unter 4 g/Wp möglich.

c) 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 auf das frühere Projekt **FLEXCIM** folgende BFE-Projekt **Large area flexible CIGS** [5a] untersucht die Hochska-

lierung von CIGS Solarzellen auf grösseren flexiblen Substraten. Zum einen sollen dabei die notwendigen Vakuum-Depositionsanlagen verbessert werden, andererseits der Wirkungsgrad und die Zuverlässigkeit der CIGS-Solarzellen erhöht werden. Das Ziel lautet auf einen Wirkungsgrad von 12% auf Polyimidsubstraten. Weiter sollen alternative Rückseitenkontakte entwickelt werden. Ein wichtiger Punkt bei der grossflächigen Deposition ist eine genügend homogene Verteilung der Schichteigenschaften (z.B. Schichtzusammensetzung, Schichtdicke) über die Fläche des Substrates. Auf einer Fläche von 30 x 30 cm² wurde in der Schichtzusammensetzung und der Schichtdicke eine Standardabweichung von 2 – 6% erzielt. Erste ganze Solarzellen auf derselben Fläche erzielten einen Wirkungsgrad von mehr als 8%, wobei die Reproduzierbarkeit noch verbessert werden muss (Fig. 2).

In einem neuen BFE-Projekt **Thin film CIGS solar cells with a novel low cost process** [5b] entwickelt die Gruppe Dünnschichtphysik eine völlig neuartige Herstellung einer CIGS Solarzelle. Unter Verwendung einer Ionenaustausch-Reaktion wird dabei Kupfer aus wässrigen, kupferhaltigen Lösungen in dünne Filme von Indiumselenid eingebaut. Letztere werden durch Ko-Evaporation hergestellt. Der Kupferanteil in der durch die Ionenaustausch Reaktion erzeugten *Precursor*-Schicht ist dabei stark vom Substrat anhängig. Struktur und Zusammensetzung der so erzeugten Schichten wurden durch oberflächenanalytische Methoden bestimmt. Die auf dieser Grundlage hergestellten CIGS-Solarzellen erreichten bisher einen Wirkungsgrad von 4.1%. Allerdings erweist sich der Molybdän-Zellenrückkontakt in der Ionenaustausch-Reaktion als instabil.

Das EU-Projekt **LARCIS** [5c] befasst sich mit grossflächigen Prozessen zur industriellen Produktion von CIGS-Solarzellen. Dabei konzentriert sich die Gruppe Dünnschichtphysik an der ETHZ auf die Optimierung der Zellrückkontakte auf der Grundlage von Molybdän sowie alternativer Materialien, insbesondere TiN und ZrN bzw. deren Kombination mit Molybdän. Sowohl für Rückkontakte unter Verwendung von TiN wie für ZrN werden in Kombination mit Molybdän durchwegs höhere Werte der Zellspannung bzw. des Füllfaktors und damit höhere Wirkungsgrade erzielt als ohne Molybdän. Die besten Wirkungsgrade werden auf einer 10 nm dicken Molybdän-Schicht unter Einsatz einer Natrium-Behandlung erzielt und liegen bei 13.9% für ZrN bzw. 13.8% für TiN. Es wurden verschiedene Arten der Natrium-Behandlung untersucht.

Im Integrierten EU-Projekt **ATHLET** [5d] ist die Gruppe Dünnschichtphysik an zwei Arbeitspaketen zu CIGS-Solarzellen beteiligt. Im Vordergrund stehen einerseits ergänzende Entwicklungsar-

beiten für flexible Solarzellen auf Polyimid; andererseits werden neue Verfahren für Pufferschichten auf der Grundlage von In₂S₃ und die Abscheidung der Solarzellen auf TCO-Schichten vertieft untersucht. Weitere Arbeiten befassen sich mit der Hochskalierung auf grössere Flächen und die Entwicklung von Tandemsolarzellen. Die beste CIGS Solarzelle wurde mit einer 60 nm dicken In₂S₃-Pufferschicht erzielt und erreichte einen Wirkungsgrad von 14.1%.

In einem neuen, durch den *Axpo Naturstrom Fonds* 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.

d) Farbstoff und organische Solarzellen

Die Entwicklung von farbstoffsensibilisierten, **nanokristallinen Solarzellen** [7] wurde am Institute of Chemical Sciences and Engineering (ISIC) der EPFL fortgesetzt. Im Berichtsjahr standen die Farbstoffsynthese und die Langzeitstabilität der eingesetzten Elektrolyten bei höheren Temperaturen (ca. 80 °C) im Vordergrund. Damit wird eine Lebensdauer der Farbstoffzellen von 10 bis 20 Jahren angestrebt. Mit Elektrolyten basierend auf ionischen Flüssigkeiten konnte im Berichtsjahr nach bisher enttäuschenden Resultaten ein photovoltaischer Wirkungsgrad von 7.6% erreicht werden, was einen Rekord für lösungsmittelfreie Farbstoff Solarzellen darstellt. Mit einem neuen Ansatz unter Verwendung von eutektischen Mischungen von flüssigen Salzen als Redox Elektrolyt wurde ein Wirkungsgrad von 8.2% erreicht. Zudem wurden erste Tandemzellen in Kombination mit CIGS-Solarzellen hergestellt, welche einen Wirkungsgrad von 15% erreichten.

Das neue durch die EMPA Dübendorf koordinierte CCEM-Projekt **ThinPV** [8a, 8b], welches auch durch *swisselectric research* unterstützt wird, führt die verschiedenen Akteure der Schweizer Dünnschicht-Solarzellenforschung in einem Projekt zusammen. In einer Zusammenarbeit zwischen dem ISIC an der EPFL und der EMPA Dübendorf wurde ein neuer Farbstoff unter Verwendung unsymmetrischer Squaraine synthetisiert. Damit konnte trotz der engen spektralen Bandbreite dieses Farbstoffs eine hohe Ausbeute entsprechend einem photovoltaischen Wirkungsgrad von 4.5% erzielt werden. An der EMPA Dübendorf finden im Labor für funktionale Polymere auch grundlegende Arbeiten zu organischen Solarzellen statt. Im Vordergrund steht dabei die Nutzung von Cyanin-Farbstoffen sowie die Nanostrukturierung des Übergangs zwischen Donor- und Akzeptor-Materialien. Im Berichtsjahr konnte gezeigt werden, dass die Dotierung des Cyanin-Farbstoffs zu einer starken Erhöhung des Photostroms und

damit des Wirkungsgrades führen kann. Mit der Dotierung in einer Kombination von Cyanin und C₆₀-Fullerenen hergestellten Solarzelle konnte der Wirkungsgrad von 0.14% auf 1.2% erhöht werden. Die EMPA Dübendorf führt weiter eine KTI-Machbarkeitsstudie zum Thema **Transparent and Flexible Solar Cell Electrodes made from Precision Fabric** [8c] durch.

Solaronix beteiligt sich weiterhin am EU-Projekt **FULLSPECTRUM** [9a], einem *Integrierten Projekt* im Bereich der Photovoltaik, welches unterschiedliche Ansätze zur besseren Nutzung des Strahlungsspektrums in einem Projekt zusammenführt (III-V *multijunctions*, Thermophotovoltaik, *intermediate band cells*, molekulare Konzepte); dabei werden Wirkungsgrade bis zu 40% angestrebt. Solaronix ist in diesem Projekt insbesondere mit unterstützenden Arbeiten im Modul zu neuen molekularen Konzepten beteiligt. Dabei geht es um die Rolle von Farbstoffsolarzellen in 2-Photon Prozessen bzw. in flachen Konzentratoren. Solaronix befasst sich hier mit den Messungen der Stromspannungskennlinie, der spektralen Empfindlichkeit und der Stabilität der flachen Konzentratoren.

Das neue EU-Projekt **OrgaPvNet** [9b] 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 4 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** [9c] 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 monolytisch verschaltete Farbstoffzellen-Kleinmodule (10 x 10 cm²) mit 5.6% Wirkungsgrad hergestellt.

Das Institut für Solartechnik (SPF) an der Hochschule Rapperswil baut mit dem BFE-Projekt **PECNet** [10] 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.

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 *gebäudeintegrierter* Anlage zu verstehen (angebaute Anlagen oder echte Integration) ist. 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. 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) ist am EU-Projekt **BIPV-CIS** [11] beteiligt, welches im Berichtsjahr abgeschlossen wurde. Ziel des Vorhabens war es, die Eigenschaften der Photovoltaik Gebäudeintegration mit Dünnschicht Solarzellen zu verbessern. Durch den rasch wachsenden Photovoltaik Markt wurden die Ziele des EU-Projektes nicht im erwünschten Ausmass erfüllt. Für die 3S geht es darum, die Integration von Photovoltaik in die Gebäudehülle zu fördern. Dazu sollten geeignete Produkte wie Photovoltaik Dachelemente und Photovoltaik-Isoliergläser mit den notwendigen elektrischen Anschlüssen und Verkabelungen entwickelt werden. Im Rahmen des Projektes wurde auch eine Marktübersicht über gängige Photovoltaik-Systeme sowie eine Übersicht über für die Photovoltaik relevante europäische Baustandards erstellt. 3S hat ein neues Dachelement für die Photovoltaik-Gebäudeintegration entwickelt. Dieses basiert auf einem herkömmlichen Photovoltaik-Laminat, aus dem in einem Schritt mittels Spritzguss ein fertiges Dachelement hergestellt wird. Das Konzept ist abgeschlossen, Konstruktionszeichnungen in fortgeschrittenem Stadium bestehen und die wichtigsten Zulieferer wurden evaluiert, was umfangreiche Materialprüfungen verlangte. Trotz Projektabschluss als EU-Projekt soll das Vorhaben in der Schweiz weiterverfolgt werden.

Vereinzelt 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 Kom-

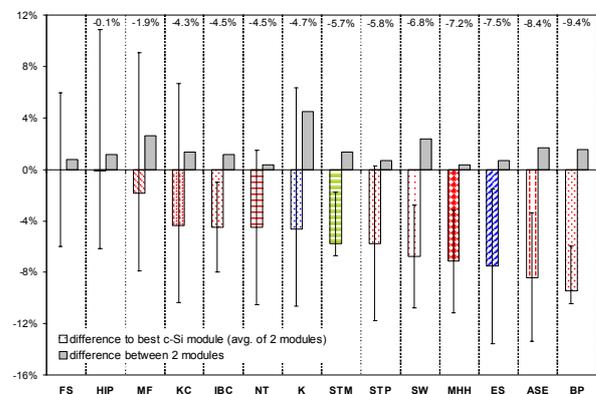
ponenten (Module, Wechselrichter), Systemen (Auslegung, Energieertrag) und Anlagen (Langzeitbeobachtungen). Die Erkenntnisse aus diesen anwendungsnahen Fragen sind – besonders in einem rasch wachsenden Markt – für Sicherheit, Zuverlässigkeit und Energieertrag künftiger Anlagen wie auch für die Standardisierung 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. Die Qualitätssicherung ist umso bedeutender, als auf dem Markt in letzter Zeit vermehrt qualitativ ungenügende Produkte aufgetaucht sind [43].

Das ISAAC (Istituto di sostenibilità applicata all'ambiente costruito) an der SUPSI (Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana) hat im Berichtsjahr das Projekt **Centrale LEEE-TISO 2003-2006** [12a] abgeschlossen. Das gemäss ISO 17025 für Messungen zertifizierte Labor mit dem Sonnen-Simulator der Klasse A erhielt im April 2007 die erneute offizielle Akkreditierung. Die als Dienstleistungen für Dritte ausgeführten Messungen der Strom-Spannungs-Kennlinie von Solarmodulen konnten mit einer Anzahl von 342 ausgeführten Messungen deutlich zulegen. Zudem wurden für einzelne Produkte weitere Parameter wie Temperaturkoeffizienten oder das Verhalten bei unterschiedlicher Einstrahlung bestimmt.

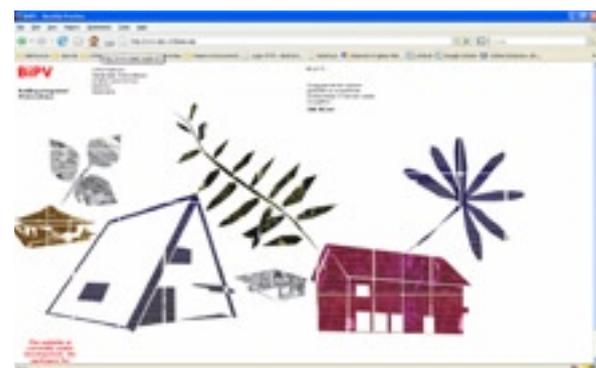
Der 10. Testzyklus der Aussenmessungen wurde im Berichtsjahr an 14 kommerziellen Modulen abgeschlossen (8 mc-Si, 2 sc-Si, 1 HIT, 2 a-Si, 1 CdTe). Nach 15 Monaten Messzeit lag die stabilisierte Leistung aller Module im Mittel bei 3.7% unter der Nominalleistung, bzw. zwischen -0.7% und -8.2% und damit für alle Module innerhalb der Produktgarantien. Fast alle der über die letzten 5 Testzyklen gemessenen Module aus kristallinem Silizium zeigten in den ersten Betriebsstunden eine kleine Anfangsdegradation von im Mittel -1.1%. Die Unterschiede in der jährlichen Energieproduktion der 14 gemessenen Modultypen in [kWh/kWp] beträgt mit der Nominalleistung als Referenz 10%; nimmt man die real gemessene Leistung als Referenz, so liegen die Unterschiede tiefer (Fig. 3). Das ISAAC hat im Berichtsjahr die Arbeiten zur gebäudeintegrierten Photovoltaik fortgesetzt. Es wurde eine Produktdatenbank erstellt, welche über www.bipv.ch abrufbar ist (Fig. 4).

Das ISAAC beteiligte sich im Berichtsjahr an den Arbeiten zum EU-Projekt **PERFORMANCE** [12b]. Dieses, vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg i. B. koordinierte, 4-jährige *Integrierte 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 Performanz und Energieproduktion von Photo-

voltaik Modulen sowie der Modellierung beteiligt. 6 europäische Testlaboratorien mit unterschiedlicher Infrastruktur führten im Berichtsjahr einen *Round Robin Test* an Modulen aus kristallinem Silizium durch. Die gemessenen Maximalleistungen zwischen den verschiedenen Laboratorien liegen alle innerhalb $\pm 2\%$. Weitere solche Tests sind vorgesehen, einerseits zur Verbesserung der Verfahren, andererseits bei unterschiedlichen Einstrahlungen. Ziel ist, dass alle Laboratorien innerhalb $\pm 1\%$ der Messwerte liegen. Die Messungen werden auch für Dünnschicht Solarmodule durchgeführt, was eine grössere Herausforderung an die Messverfahren stellt. Ein *Round Robin Test* zur Modellierung und Voraussage der Energieproduktion der Solarmodule zeigte Werte innerhalb $\pm 5\%$ für alle Technologien bzw. $\pm 3\%$ für kristalline Module.



Figur 3: Unterschiede in der jährlichen Energieproduktion von 14 Solarmodulen in [kWh/kWp] (Bildquelle: ISAAC)



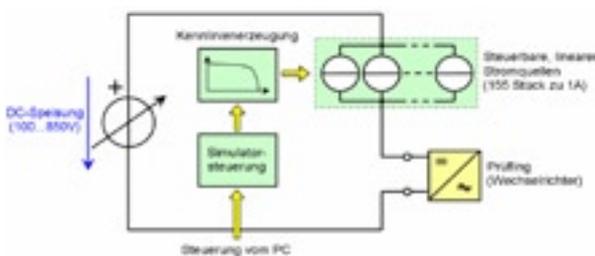
Figur 4: BIPV homepage www.bipv.ch (Bildquelle: ISAAC)

Wirkungsgrad und Jahresenergieproduktion von Photovoltaik Modulen sind auch Bestandteil eines Projektes am PSI [13a], welches im Berichtsjahr abgeschlossen wurde. Aufgrund der Messungen an verschiedenen kommerziellen Modulen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen wurde ein semi-empirisches Modell für den Wirkungsgrad parametrisiert. Das Modell wurde mit Modulen aus kristallinem Silizium validiert. Mes-

sungen an Dünnschicht Modulen wurden ebenfalls durchgeführt. Damit wurde das Verhalten des Wirkungsgrades der Module in Funktion von Einstrahlung, Temperatur und Luftmasse bestimmt. Es konnten Aussagen zum erwarteten Energieertrag unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen gewonnen werden.

Am Photovoltaiklabor an der FH Burgdorf wurde das Projekt **Photovoltaik-Systemtechnik PV-SYSTE** [14] fortgesetzt. Die teilweise seit 1992 ohne Unterbruch durchgeführten Langzeitmessungen an über 60 PV-Anlagen wurden weitergeführt. Die zweite Ausbautetappe der Anlage «Stade de Suisse» (neu 1,35 MW_p) wurde ins Messprogramm integriert. Die weitergeführte Ausfallstatistik der Wechselrichter zeigt im vergangenen Jahr wieder eine erfreulich tiefe Anzahl der registrierten Ausfälle. Zum Test von Solarwechselrichtern verfügt die FH Burgdorf nebst einer Testanlage von 60 kW_p auf dem Dach auch über zwei hochstabile, computergesteuerte Solargenerator-Simulatoren von 20 kW bzw. 25 kW Leistung, welche jederzeit eine beliebig einstellbare Solargeneratorkennlinie nachbilden können. Zum Test von grösseren Zentralwechselrichtern, die oftmals über eine Nennleistung von etwa 100 kW verfügen, reicht die vorhandene Testinfrastruktur aber nicht mehr aus. Um auch diese modernen Wechselrichter mit voller Leistung ausmessen zu können, wurde mit dem Bau eines neuen Solargenerator-Simulators mit einer Nennleistung von 100 kW begonnen (Fig. 5). Bisher wurden die Teilstromquellen (15 Quellen zu 10 A und eine Quelle zu 5 A) aufgebaut und ausgetestet (Fig. 6). In zunehmendem Mass führt auch das Photovoltaiklabor Messungen an Wechselrichtern als Dienstleistungen für Dritte aus.

Enecolo schloss das Projekt **SIMIBU** zur Machbarkeit eines Wechselrichters mit integriertem Backup im Berichtsjahr ab [15a]. Das Ziel des



Figur 5: Blockschaltbild des 100 kW Simulators (Bildquelle: FH Burgdorf)

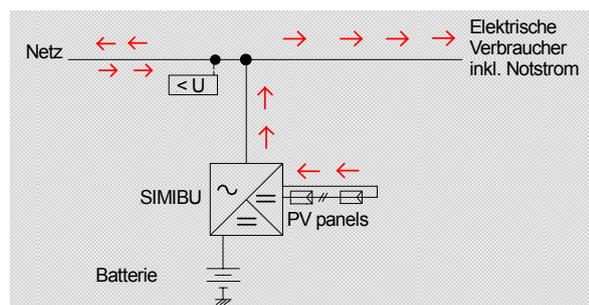
Projektes war, die Kombination eines Wechselrichters mit einer unterbrechungslosen Stromversorgung (USV) zu untersuchen (Fig. 7). Solange das öffentliche Netz vorhanden ist, funktioniert der Wechselrichter als gewöhnlicher Solarwechselrichter und die USV-Anlage ist auf *Standby*. Erst bei einem allfälligen Netzausfall kommt die USV-



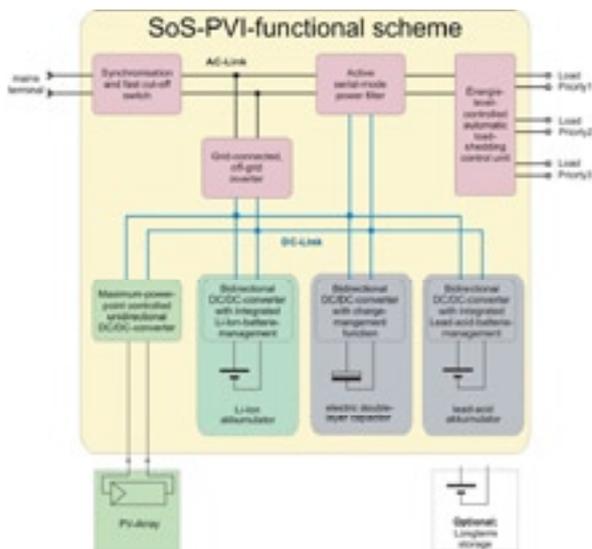
Figur 6: Montagezustand des 100 kW Simulators im Dezember 2007 (Bildquelle: FH Burgdorf)

Funktion zum Tragen. Der gleiche Wechselrichter versorgt dann die angeschlossenen Geräte mit Strom bis das öffentliche Netz wieder funktioniert. In Zusammenarbeit mit *Sputnik Engineering* konnte die technische Machbarkeit des Konzeptes mit vertretbarem Aufwand aufgezeigt werden. Mögliche Anwendungsgebiete sind Regionen mit häufigen Stromunterbrüchen, Entwicklungsländer ohne Netzanschluss, aber mit der späteren Option eines Netzanschlusses, sowie Regionen mit hoher Netzbelastung während der Tageszeit und entsprechend teuren Spitzenlastpreisen. Eine Pilotanlage soll nun die Funktionstüchtigkeit des Konzeptes aufzeigen.

Ein ähnliches Ziel verfolgt unabhängig davon das EU-Projekt **SOS-PVI** (*Security of Supply Photovoltaic Inverter*) [16], in welchem *Maxwell Technologies* als Schweizer Partner mitarbeitet. In diesem Vorhaben werden fünf Prototypen eines entsprechenden Wechselrichters erarbeitet. Nebst der technischen Lösung für den Wechselrichter, werden vor allem auch Fragen zur Lastkurve in bestimmten Netzen und die notwendigen Regelkreise untersucht (Fig. 8).



Figur 7: Stromflüsse in einem netzgekoppelten System mit Backup Funktion (Bildquelle: Enecolo)

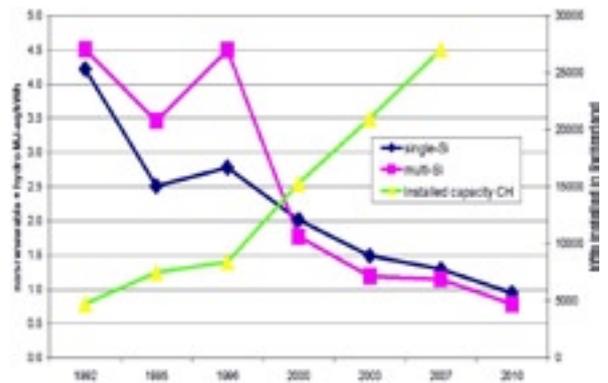


Figur 8: Architektur des SOS-PVI Projektes (Bildquelle: Maxwell Technologies)

ERGÄNZENDE PROJEKTE UND STUDIEN

Enecolo hat im Berichtsjahr das Projekt **PV-BUK** [15b] durchgeführt. Ziel dieses Projektes war es, die tatsächlichen Betriebs- und Unterhaltskosten (B&U-Kosten) von Photovoltaik-Anlagen zu eruieren, die zukünftige Entwicklung der B&U-Kosten abzuschätzen und einen Massnahmenkatalog zur Senkung der B&U-Kosten zu erarbeiten. Dazu wurden in der Literatur sowie durch Interviews und mit Hilfe von Fragebogen bei Experten und Anlagenbesitzern möglichst viele Informationen zu den B&U-Kosten von PV-Anlagen in der Schweiz und in Deutschland gesammelt. Es zeigte sich, dass die Betriebskosten pro kWh Solarertrag mit zunehmender Anlagengrösse und zunehmendem spezifischem Ertrag sinken. Bei einer 10-kWp-Anlage betragen die Betriebskosten ca. 10 Rp./kWh, bei einer 30-kWp-Anlage 8 Rp./kWh und bei einer 100-kWp-Anlage noch 6 Rp./kWh. Der grösste Teil der B&U-Kosten wird für Ersatzgeräte benötigt, insbesondere den Wechselrichter.

ESU-Services hat im Berichtsjahr das Projekt **Update Photovoltaik Ecoinvent Data V2.0** abgeschlossen [17a]. Aufgrund von Lebenszyklusinventaren von Photovoltaikprodukten wurden neue Lebenszyklusanalysen (*Life Cycle Analysis – LCA*) für industriell aktuelle Photovoltaik-Technologien erstellt. Damit wurde das Ziel verfolgt, in der *Ecoinvent*-Datenbank [44] möglichst aktuelle Umweltanalysen der Photovoltaikindustrie zu publizieren. Neben der Aufdatierung von mono- und multikristallinen Solarmodulen wurden erstmals Daten für die Herstellung und den Betrieb von Dünnschichtmodulen (CIS und CdTe) erhoben. Eine anschauliche Darstellung der Energierücklaufzeit ist in der Figur auf der Titelseite dieses Berichtes dargestellt. Mit dem Vorhaben konnte auch belegt werden, in welchem Ausmass der kumulierte Energieaufwand für die Photovoltaik



Figur 9: Kumulierter Energieaufwand für die Photovoltaik im Verlauf der Zeit (Bildquelle: ESU Services)

in den letzten 15 Jahren reduziert werden konnte (Fig. 9). Das Projekt erfolgte in Zusammenarbeit mit der Europäischen Photovoltaik-Industrievereinigung EPIA und ist zudem ein Beitrag eines neuen entsprechenden IEA-PVPS Projektes [17b].

Das Projekt **ENVISOLAR** [15c] der Europäischen Weltraumagentur ESA, bei welchem *Enecolo* mitwirkte, wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Das Projekt hatte die vermehrte Nutzung satellitengestützter Solarstrahlungsdaten in der Solarindustrie zum Ziel. Mit den im Projekt entwickelten Dienstleistungen sollen Standortanalysen und -entscheide vereinfacht, das automatische Anlagenmonitoring unterstützt sowie Vorhersagen der Energieproduktion von Solaranlagen ermöglicht werden. Die Publikation zum Projekt gibt einen ausgezeichneten Überblick über die verschiedenen existierenden Verfahren [45]. In der Schweiz besteht ein enger Bezug zum online Photovoltaik-Monitoring-Dienst SPYCE [46], welchen *Enecolo* zusammen mit *Meteotest* betreibt.

Die Machbarkeitsstudie zur Bestimmung des Potenzials von **Quantum Dot Konzentratoren** [18] für die Photovoltaik wurde durch das LESO der EPFL abgeschlossen. Es wurde modellmässig und experimentell untersucht, ob mit dieser neuartigen Methode grossflächige (lateral wirkende) Konzentratoren auf Gläsern realisierbar sind und welche elektrische Leistung damit möglich ist. Als Technologie zur Herstellung der *Quantum Dot*-Schichten wurde die Sol-Gel-Methode eingesetzt. Erste Schätzungen lassen einen Systemwirkungsgrad von mehr als 6% erwarten.

In Hinsicht auf die immer wichtiger werdende Photovoltaik Gebäudeintegration hat *Zagsolar* zusammen mit dem BRENET-Netzwerk das **Konzept eines Kompetenzzentrums für gebäudeintegrierte Solaranlagen** (photovoltaisch und thermisch) [19] erarbeitet. Dabei stehen die Qualitätssicherung und die Möglichkeiten zur Zertifizierung von Produkten im Vordergrund, begleitet von Massnahmen zur Information sowie Aus- und Weiterbildung.

Das PSI beteiligt sich im Rahmen des EU-Projekts **FULLSPECTRUM** [13b] an den internationalen Arbeiten zum Thema der Thermophotovoltaik (TPV). Gestützt auf frühere Projekte bearbeitet 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 weiterentwickelt werden.

Das symbolträchtige Projekt **SOLARIMPULSE** [20a] 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** [21], welches von einer Westschweizer Gruppe um den Initianten Raphaël Domjan entwickelt wird. PlanetSolar soll ein so-

larbetriebenes Boot werden, welches die Erde auf dem Wasser umrunden wird. Beide Projekte stellen primär private Initiativen dar, wobei in konkreten Technologiefragen eine Zusammenarbeit mit Hochschulen erfolgt. So verfolgt **SOLARIMPULSE** zusammen mit der EPFL das KTI-Projekt **Ultralight Photovoltaic Structures** [20b], in welchem neue ultraleichte Sandwichstrukturen mit Photovoltaik entwickelt werden.

Beide Projekte beinhalten einerseits grosse technische Herausforderungen, andererseits genießen sie aufgrund ihres Kommunikationspotenzials ein grosses Interesse der Öffentlichkeit. Nicht zuletzt stehen die beiden Vorhaben in einer gewissen Konkurrenz zueinander. Entlang dieses Gedankens kann auch das Projekt **Solartaxi** [22] genannt werden, welches noch einen Schritt konkreter geworden ist, in dem eine Fahrt mit einem Solarfahrzeug rund um die Welt im Sommer 2007 in Luzern begonnen hat. Mittlerweile hat das Solartaxi bereits Australien erreicht.

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)* [47]. 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. Mit diesem Ansatz wird ein stärkerer Einbezug verschiedener Zielgruppen in die Arbeiten im Rahmen von IEA PVPS sichergestellt.

Nova Energie vertritt die Schweiz im IEA PVPS-Projekt **Informationsaktivitäten** [23]. Im Berichtsjahr wurde ein weiterer nationaler Bericht über die Photovoltaik in der Schweiz bis 2006 [48] ausgearbeitet; auf dieser Grundlage wurde die 12. Ausgabe des jährlichen internationalen Berichtes («*Trends Report*») über die Marktentwicklung der Photovoltaik in den IEA-Ländern erstellt [49]. Dieser Bericht stellt eine immer häufiger zitierte Referenz dar und wurde erneut für aktuelle Analysen der Photovoltaik durch den Finanzsektor verwendet [50]. Im Berichtsjahr wurden mehrere Workshops organisiert: An der 22. Europäischen Photovoltaik-Konferenz in Mailand fand ein Workshop zum Thema der Datenbeschaffung von Marktzahlen und deren Interpretation statt. Ein weiterer Workshop fand an der Asiatischen Photovoltaik Konferenz Ende 2007 in Fukuoka statt [51]; er wurde durch die Schweiz und Japan organisiert. Der *IEA PVPS-Newsletter* [52] informiert

regelmässig über die Arbeiten in und rund um das IEA PVPS-Programm und wird an 250 Adressaten in der Schweiz verteilt. Im Berichtsjahr wurde die *homepage* von IEA PVPS [53] überarbeitet.

In IEA PVPS-Projekt **Betriebserfahrungen** [24] stellt TNC den Schweizer Beitrag. Dieses Projekt wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Die PVPS-Datenbank *Performance Database*, welche auch online zugänglich [54] ist, umfasst 505 Photovoltaik Anlagen 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. Im Teilprojekt *Photovoltaic System Cost over Time* wurde eine breit abgestützte Informations- und Datenbasis für die Entwicklung der PV-Systempreise und Unterhaltskosten geschaffen. Zum Abschluss der Projekte wurden verschiedene Publikationen erarbeitet [55, 56, 57, 58]. Aufgrund der Bedeutung von Qualitätssicherung und Zuverlässigkeit von Photovoltaik-Anlagen für den wachsenden Markt besteht die Absicht, ein Folgeprojekt zu definieren.

Im Rahmen der interdepartementalen Plattform (SECO, DEZA, BAFU, BFE) zur Förderung der erneuerbaren Energien in der internationalen Zusammenarbeit *REPIC* [59] leistet *entec* den Schweizer Beitrag zum IEA PVPS-Projekt **Photovoltaik-Entwicklungszusammenarbeit** [25a]. 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 Deutschland, Frankreich und Belgien abgehalten. Das Projekt 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. Im Berichtsjahr wurde besonders das Thema der Wasserversorgung vertieft; dazu organisierten die Schweiz und Deutschland einen Workshop in Thailand, welcher die bisherigen Erfahrungen aufarbeitete und offen diskutierte. Es wird allgemein eine bessere Vernetzung mit den wichtigen Aktivitäten zur Wasserversorgung angestrebt.

Planair vertritt die Schweiz im IEA PVPS-Projekt **Photovoltaik im urbanen Raum** [26]. 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. Es besteht ein enger Kontakt mit dem EU-Projekt **PV-Upscale** [60], welches ähnliche Ziele auf europäischer Ebene verfolgt. Es fanden in der Schweiz zwei transdisziplinäre Ateliers (je eines in Neuchâtel und eines in Zürich) zur Diskussion von städteplanerischen Fragestellungen rund um die Photovoltaik statt. Im Berichtsjahr wurden verschiedene neue Berichte erarbeitet [61, 62, 63]. 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 im IEA PVPS-Projekt **hybride Photovoltaik-Systeme in Mininetzen** [27], einem Gebiet, das – wenn auch nicht so sehr in der Schweiz – global von immer grösserem Interesse wird und weitreichende technische Fragestellungen betreffend Systemdesign, Regelungsfragen und der Penetration von Photovoltaik in Mininetzen beinhaltet.

ESU Services vertritt die Schweiz im neu geschaffenen IEA PVPS-Projekt **Umwelt-, Sicherheits- und Gesundheitsaspekte** [17b] 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. Ausserdem befasst sich das Projekt auch mit den Methoden zur Rezyklierung von Photovoltaik Modulen.

Meteotest [28] und das CUEPE an der Universität Genf [29] erbringen zusammen den Schweizer Beitrag zum Projekt **Solar Resource Knowledge Management** des IEA Solar Heating-Programms. Dieses Projekt sieht vor, die verschiedenen Methoden und Datengrundlagen von Solardaten global aufzuarbeiten und verfügbar zu machen. Das Projekt ist inhaltlich für alle Solartechnolo-

gien relevant; dementsprechend erfolgt eine Zusammenarbeit mit den weiteren IEA-Programmen zur Solarenergie (IEA PVPS und IEA PACES). Im Projekt wird die Qualität verschiedener Strahlungsmodelle und daraus abgeleiteter Produkte verglichen und optimiert. Im Berichtsjahr konzentrierten sich die Arbeiten auf die Strahlungsvorhersage und die Turbidität der Atmosphäre.

SWISSOLAR vertritt die Schweiz im Technical Committee 82 der International Electrotechnical Commission (IEC) zu **Photovoltaik Normen** [30]. Die Normenarbeit im Bereich der Photovoltaischen Systeme ist in 6 *Working Groups* aufgeteilt (*Glossary, Modules, non-concentrating Systems, PV energy storage systems, Balance-of-system components, Concentrator modules*). Normen sind in jeder Technik wesentlicher Bestandteil der Produktentwicklung, der Tests und der Qualitätsüberprüfung. Der sich rasch entwickelnden Photovoltaik-Industrie fehlen noch eine ganze Reihe von wichtigen, international anerkannten Normen, wobei sich die Lücke dank dem wachsenden Interesse an Normen nun schnell zu schliessen beginnt. 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 internationalen IEC harmonisiert werden sollen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Regeln, welche die Performance betreffen und solchen, welche die Sicherheit oder die Qualität der Komponenten und Anlagen bzw. der Benutzer betreffen. Fragen zur Sicherheit sind traditionell eher national ausgerichtet, und es ist auch anderen Normenkomitees mit bisher wenigen Ausnahmen nicht gelungen, im Bereich Sicherheit eine IEC-Norm als verbindliche Norm auch national einzuführen. Eine Ausnahme dazu bildet nun seit einigen Jahren die EU, welche das Parallelvoting für IEC-Normen für Cenelec Normen eingeführt hat. Zur Zeit sind auf IEC-Ebene 28 Dokumente in Bearbeitung. In der Schweiz werden die Arbeiten begleitet [64].

Die Beteiligung am EU-Projekt **PV-ERA-NET** [25b], welches Programmkoordinationsstellen und verantwortliche Ministerien aus 13 Ländern unter dem ERA-NET Schema [65] 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 Programmen abgeschlossen. Eine erste gemeinsame Ausschreibung **POLY-MOL** zum Thema von organischen und Polymer-

Solarzellen fand statt und verzeichnete insgesamt 9 Projektvorschläge. Die Schweiz ist an dieser Ausschreibung beteiligt. Die geförderten Projekte werden in der ersten Jahreshälfte von 2008 ausgewählt. Ein bedeutendes Thema bildete zudem die in der Europäischen Photovoltaik Technologie Plattform publizierte *Strategic Research Agenda* (SRA) [42], welche als wichtiges europäisches Referenzdokument betrachtet wird.

Auf der Projektebene konnte die erfolgreiche Zusammenarbeit innerhalb der EU in bestehenden und neuen Projekten fortgesetzt werden. Im Jahr 2007 waren es 11 Projekte im 6. Rahmenforschungsprogramm der EU, wovon 3 dieser Projekte *Integrierte Projekte* (FULLSPECTRUM, PV-ATHLET, PERFORMANCE) sind. Ein weiteres Projekt fand mit der esa statt. Es findet ein regelmässiger Kontakt mit den Programmverantwortlichen in EU-Ländern statt, ebenso mit den zuständigen Einheiten bei der Europäischen Kommission.

Die Schweiz ist in der Europäischen Photovoltaik Technologie Plattform [66] sowohl im Steuerungsausschuss wie in einzelnen Arbeitsgruppen vertreten. Technologie Plattformen sind ein neues Instrument der EU-Technologieförderung, welches für ausgewählte Technologien eine breitere Trägerschaft und eine gemeinsame Strategie der beteiligten Akteure ermöglichen soll, indem For-

schungskreise, Industrie, der Finanzsektor und staatliche Stellen in einer gemeinsam getragenen Plattform eingebunden sind und die notwendigen F&E-Anstrengungen sowie die Massnahmen zur Umsetzung koordiniert angehen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die starke Einbindung der Industrie, welche im Rahmen der Technologie-Plattformen eine tragende Rolle spielt. Im Berichtsjahr wurde die *Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology* (SRA) [42] publiziert. 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 (nationaler und EU) Forschung. Im Rahmen des von der Europäischen Kommission vorgeschlagenen *Strategic Energy Technology Plan (SET Plan)* [67] wurden die Vorschläge des Photovoltaiksektors zu beschleunigenden Massnahmen in Hinsicht auf die EU 2020-Energieziele formuliert.

Weitere Kontakte wurden mit internationalen Stellen mit Bedeutung für die Entwicklungszusammenarbeit gepflegt (Weltbank, GEF, IFC, UNDP, UNEP, GTZ, KfW, REEEP u.a.). Die Schweizer Photovoltaik ist angesichts dieser zahlreichen Wechselwirkungen international weiterhin sehr präsent.

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.

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 dem VSE, der *swisselectric* und der *Gesellschaft Mont-Soleil*. Diese vielfältigen Kontakte erlauben die anhaltend wichtige breite Abstützung des Programms.

Pilot- und Demonstrationsprojekte (P+D)

Wie letztes Jahr konnten auch dieses Jahr wieder zwei neue BFE PV P+D Projekte begonnen werden. Seit 2003 wurden damit insgesamt 4 neue Projekte gestartet. Ein weiteres P+D-Projekt wird durch den *Axpo Naturstromfonds* unterstützt. Wenig im Vergleich zur Zeit vor 2003, wo jährlich 10 und mehr Projekte ins P+D Programm aufgenommen wurden. Ein Teil dieser 'alten' Projekte setzt im aktuellen Photovoltaik Markt erfreulicherweise noch Jahre später Akzente. Das Photovoltaik P+D-Programm ist inzwischen auf wenige Pro-

jekte geschrumpft, die sich überwiegend in der Abschlussphase befinden. Diese Entwicklung ist sehr zu bedauern, weil damit ein wesentliches Glied in der Umsetzung von Forschung und Entwicklung hin zu industriellen Produkten und Verfahren, und damit zum Markt stark geschwächt wird. Damit bleibt die Wirkung dieses Programms weiterhin eingeschränkt, und Schweizer Firmen haben es zunehmend schwerer, neue und innovative Produkte für den Photovoltaik Anwendungsbereich auf den Markt zu bringen.

Bei einem der zwei neuen BFE PV-P+D-Projekte wird auf der Basis des erfolgreich abgeschlossenen P+D-Projekts **Flachdachintegration CPT mit Dünnschichtzellenmodulen** [31a] das Degradations- und Annealingverhalten von Modulen mit amorphen Zellen detaillierter untersucht. Das andere Projekt untersucht im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt **SIMIBU** [15a] das Verhalten eines Backup-Wechselrichters (netzgekoppelter Wechselrichter mit unterbruchsfreier Stromversorgung USV) im Praxistest.

Die noch verbleibenden Photovoltaik P+D-Projekte behandeln schwerpunktmässig weiterhin die Thematik der **Photovoltaik Gebäudeintegration**.

NEUE P+D PROJEKTE

- **Praxistest Backup Wechselrichter** (Verhalten eines netzgekoppelten Wechselrichters mit unterbruchsfreier Stromversorgung bei Stromausfall im Praxistest; Leitung: *Enecolo*) [32a]
- **Degradations- und Annealingverhalten von Modulen mit amorphen Zellen** (Messungen und Analysen auf der Basis der Flachdachintegration CPT Solar; Leitung: *ISAAC*) [31b]
- **2-kWp-Flexcell® Experimentaldach** mit flexiblen amorphen Solarzellen in einem Dachelement aus einer Thermoform (Leitung: *VHF Technologies*) [33] (Fig. 10)



Figur 10: 2-kWp-Flexcell Experimentaldach (Bildquelle: VHF Technologies)



Figur 12: Dachanlage Turnhalle Wiesendangen (Bildquelle: Enecolo)

LAUFENDE P+D PROJEKTE

Bei den laufenden Projekten zeigt das **Nullenergieschulhaus Ekkharthof Kreuzlingen** (Minergiebau kombiniert mit Photovoltaik und Wärmepumpe) das Potenzial dieses Konzeptes auf. 2007 schliesst dieses Gebäude über das Jahr gesehen mit mehr Energieertrag und weniger Verbrauch als erwartet insgesamt als Energieproduzent ab [34] (Fig. 11).

Die laufenden Projekte umfassen (in chronologischer Reihenfolge):

Anlagen

- **Photovoltaikanlage Nullenergieschulhaus Ekkharthof Kreuzlingen** (Einbindung einer PV Anlage ins Energiekonzept eines Nullenergieschulhauses; Leitung: *Böhni Energie und Umwelt*) [34] (Fig. 11)
- **Dachanlage Turnhalle Wiesendangen mit amorphen Dünnschichtmodulen** (Einsatz von BIOSOL XXL Dachelementen, bestehend aus UNI-Solar Dünnschichtmodulen kombiniert mit Solrif Rahmen; Leitung: *Enecolo*) [32b] (Fig. 12)
- **12 kWp Solight Pilotanlage** (Pilotmässige Umsetzung von zwei verschiedenen Solight Varianten; Leitung: *Energiebüro*) [35] (Fig.13)



Figur 11: Nullenergieschulhaus Ekkharthof Kreuzlingen (Bildquelle: Böhni Energie und Umwelt)



Figur 13: Solight Anlage in zwei Varianten (Bildquelle: Energiebüro)

Messkampagnen

- Messkampagne Wittigkofen (Detaillierte Messungen und Auswertungen mit Visualisierung der Daten zur 80-kWp-Fassade Wittigkofen; Leitung: *Ingenieurbüro Hostettler*) [36a]

Studien – Hilfsmittel – diverse Projekte

- Photovoltaikstatistik der Schweiz 2006 (Leitung: *Ingenieurbüro Hostettler*) [36b]

IM JAHR 2007 ABGESCHLOSSENE P+D PROJEKTE

Im Jahr 2007 wurden die folgenden P+D Projekte abgeschlossen (in chronologischer Reihenfolge):

Anlagen

- Kleine, **autonome Stromversorgungen mit Photovoltaik und Brennstoffzellen** (PV Insel Kleinsysteme mit Brennstoffzellen als Backup Stromlieferant zur autonomen Versorgung von netzentfernten Messsystemen im Pilotbetrieb; Leitung: *Muntwyler Energietechnik*) [37]
- **17.6-kWp-Flachdachanlage mit Dünnschichtzellenmodulen ETHZ** (Optisch diskrete Flachdachanlage mit amorphen Zellen; Leitung: *BE Netz*) [38]
- Neues PV **Fassadensystem für Module mit Dünnschichtzellen** (Entwicklung eines universellen Fassadensystems wahlweise mit oder ohne thermischer Isolation für Dünnschichtzellenmodule; Leitung: *Zagsolar / Wyss Aluhit*) [39]

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Global war das Jahr 2007 für die Photovoltaik ein weiteres erfolgreiches Jahr. In einer durch hohes Wachstum gezeichneten Marktdynamik konnte die Photovoltaik Industrie ihren Ausbau fortsetzen. Der Engpass in der Verfügbarkeit von Rohsilizium für die kristallinen Siliziumzellen besteht weiterhin. Es finden jedoch weltweit Investitionen in neue Produktionskapazitäten von Solarsilizium statt, welche die angespannte Situation in den nächsten Jahren entschärfen sollten. Trotzdem hat sich die Trendumkehr zu niedrigeren Systempreisen im Jahr 2007 fortgesetzt. Parallel dazu besteht für Dünnschicht Solarzellen aufgrund dieser angespannten Situation ein interessantes «*window of opportunity*». Es wurden 2007 zahlreiche neue Industrieprojekte mit einer Produktionskapazität von insgesamt ca. 3 GWp/Jahr angekündigt, wobei erste GWp-Einheiten diskutiert werden. Als konkretes Beispiel dieser jüngsten Entwicklung konnte *oerlikon solar* im Berichtsjahr weitere grosse Bestellungen für Depositionsanlagen von Dünnschicht Solarzellen aus amorphem Silizium entgegennehmen.

Dank der politischen Diskussionen rund um das Stromversorgungsgesetz und der darin vorgesehenen Förderung der erneuerbaren Energien erhielt die Photovoltaik auch in der Schweiz weiterhin grosse Aufmerksamkeit. Mit den im Jahr 2007 verabschiedeten Beschlüssen des Parlamentes besteht nach vielen Jahren der Ernüchterung Aussicht auf eine Verbesserung des Photovoltaikmarktes, in dem ab 2009 die kostendeckende Vergütung eingeführt wird. Obwohl im quantitativen Ausmass eng begrenzt, sollte dies 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 befanden sich bisher aufgrund einer breiten Abstützung auf einem auch international betrachtet hohen Niveau. Industrielle Umsetzung und internationale Ausrichtung werden durch die zahlreichen KTI- und EU-Projekte belegt. Andererseits bestehen durch die fehlenden P+D-Mittel und dem bisher stagnierenden Markt gewichtige Nachteile für die Umsetzung im eigenen Land. Trotz diesen erschwerten Bedingungen finden auch in der Schweiz wachsende industrielle Photovoltaik Aktivitäten statt. Gestützt auf Umfragen wird das Exportvolumen der Schweizer Photovoltaik für 2007 auf mindestens 500 Mio. CHF geschätzt. Zusammen mit dem Heimmarkt kann der Gesamtumsatz der Schweizer Photovoltaik mit mindestens 600 Mio. CHF beziffert werden.

Die Umsetzung der Schweizer Photovoltaik Forschung in industrielle Produkte ist damit vor allem auf dem Gebiet der Dünnschicht Solarzellen in den letzten Jahren eine Erfolgsgeschichte, welche in guter Übereinstimmung mit den langjährigen Programmzielen geschieht. Im Berichtsjahr wurden zwei konkrete Industrievorhaben angekündigt, welche erstmals auch die Produktion von Dünnschicht Solarzellen im industriellen Massstab in der Schweiz vorsehen: 25 MW durch *Flexcell* bzw. *VHF-Technologies* in Yverdon, 30 MW durch *Pramac* bei Locarno. Ebenfalls erfolgversprechend, 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 vereinzelt anderen Ländern, z.B. Frankreich, in den nächsten Jahren ändern.

Die bisherigen Anstrengungen im Schweizer Photovoltaik Programm bilden die wissenschaftlich-technische Ausgangslage, um im rasch wachsen-

den Photovoltaik Markt mit Schweizer Innovationen und Produkten präsent zu sein. Die lange praktische Erfahrung mit dem Bau und Betrieb von zahlreichen Photovoltaik Anlagen führten zu wichtigen Erkenntnissen, welche die Zuverlässigkeit der Anlagen und eine hohe spezifische Energieproduktion zur Folge haben. Damit sind die technologischen Voraussetzungen gegeben, dass die Schweizer Photovoltaik mit ihrem wissenschaftlich-technischen Know-how und ihren Produkten auch im internationalen Wettbewerb konkurrenzfähig und erfolgreich sein kann.

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 zielführend eingesetzt werden. Das neue Energieforschungskonzept der CORE 2008 – 2011 [68] bildet die Grundlage für die Ausrichtung der Photovoltaik Forschung ab 2008. Das entsprechende Detail Forschungskonzept wird anfangs

2008 fertiggestellt und im Sommer der CORE zur Genehmigung vorgelegt. Darin sollen die jüngsten nationalen und internationalen Entwicklungen berücksichtigt werden, um die Prioritäten der nächsten Jahre festzulegen. Ein intensiver Austausch mit den Akteuren aus Forschung und Industrie soll diesen Prozess begleiten.

Der nationale Informations- und Erfahrungsaustausch bleibt in der Schweiz weiterhin ein wichtiges Thema. Im November 2007 fand in Luzern die sehr gut besuchte 7. Nationale Photovoltaik Tagung statt. Sie war insbesondere den neuen Schweizer Rahmenbedingungen für die Photovoltaik gewidmet, was auch das grosse Interesse an der Tagung erklärt. Die Photovoltaik Webseite <http://www.photovoltai.ch> beinhaltet alle wesentlichen Informationen sowie Berichte und dient damit als wichtiges Informationsinstrument, das laufend unterhalten wird. Die Schweizer Photovoltaik war an der 22. Europäischen Photovoltaik Konferenz im September in Mailand mit ihren Beiträgen gut vertreten [69].

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer)

Einzelne Jahresberichte und Schlussberichte können von <http://www.photovoltai.ch> heruntergeladen werden. Unter den aufgeführten Internet-Adressen sind weitergehende Informationen vorhanden.

- [1] C. Ballif, (ballif@unine.ch), IMT, UNI-Neuchâtel, *Neuchâtel*: a) **Thin film silicon solar cells: advanced processing and characterization** (JB, SB Projekt 101'191) • b) **Flexible photovoltaics: next generation high efficiency and low cost thin film silicon modules** (JB) • c) **High efficiency thin-film passivated silicon solar cells and modules – THIFIC: Thin film on crystalline Si** (JB) • d) **FLEXCELLENCE: Roll-to-roll technology for the production of high efficiency low cost thin film silicon photovoltaic modules** (JB) www.unine.ch/flex/ • e) **ATHLET: Advanced Thin Film Technologies for Cost Effective Photovoltaics** (JB) <http://www.hmi.de/projects/athlet/> / www.unine.ch/pv.
- [2] K. Wasmer, (kilian.wasmer@empa.ch), Empa, *Thun*: **SIWIS: Ultra Thin Silicon Wafer Cutting by Multi-Wire Sawing** (JB) <http://www.empathun.ch>.
- [3] A. Dimitrov, (anne.dimitrov@hesge.ch), EIG / EPFL, *Genève*: **SIRE: Silicon recycling from wafering waste to produce reusable photovoltaic feedstock** (JB).
- [4] S. Schneeberger, (stefan.schneeberger@amat.com), APPLIED MATERIALS SWITZERLAND, *Cheseaux-sur-Lausanne*: **BITHINK: Bifacial thin industrial multi-crystalline silicon solar cells** (JB) <http://www.hct.ch> / <http://www.amat.com/>.
- [5] A.N. Tiwari, (tiwari@phys.ethz.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** (JB) • b) **Thin Film CIGS Solar Cells with a Novel Low Cost Process** (JB) • c) **LARCIS: Large-Area CIS Based Thin-Film Solar Modules for Highly Productive Manufacturing** (JB) • d) **ATHLET: Advanced Thin-Film Technologies for Cost Effective Photovoltaics** (JB) <http://www.hmi.de/projects/athlet/> / <http://www.tfp.ethz.ch>.
- [6] M. Kaelin, (marc.kaelin@flisom.ch), FLISOM, *Zürich*: **Development of flexible CIGS Solar Modules with metal Grids** (JB) <http://www.flisom.ch>.
- [7] M. Grätzel, (michael.gratzel@epfl.ch), EPFL, *Lausanne*: **Dye-sensitised Nanocrystalline Solar Cells** (JB) <http://isic.epfl.ch/>.
- [8] F. Nüesch, (frank.nueesch@empa.ch), EMPA, *Dübendorf*: **ThinPV a) Efficient Far Red sensitization of Nanocrystalline TiO₂ films by an unsymmetrical squaraine dye** (JB) • b) **Doping of cyanine solar cells: enhancing charge transport** (JB) • c) **Transparent and Flexible Solar Cell Electrodes made from Precision Fabric** <http://www.empa.ch>.
- [9] T. Meyer, (toby@solaronix.com), SOLARONIX, *Aubonne*: a) **FULLSPECTRUM: A new PV wave making more efficient use of the solar spectrum** (JB) <http://www.fullspectrum-eu.org/> • b) **ORGAPVNET: Coordination Action towards stable and low-cost organic solar cell technologies and their application** (JB) • c) **NAPOLYDE: Nano structured polymer deposition processes for mass production of innovative systems for energy production & control and for smart devices** (JB) <http://www.napolyde.org> / <http://www.solaronix.com>.
- [10] M. Spirig, (info@solarenergy.ch), INSTITUT FÜR SOLARTECHNIK SPF, *Rapperswil*: **PECNet: Aufbau eines Schweizer Kompetenznetzwerks für die Solare Wasserspaltung mittels hybrider PV-PEC Zellen** (JB) <http://www.solarenergy.ch>.

- [11] T. Szacsnyay, (sz@3-s.ch), 3S, Lyss: **BIPV-CIS- Improved integration of PV into existing buildings by using thin film modules for retrofit** (JB) <http://www.3-s.ch>.
- [12] A. Bernasconi, (angelo.bernasconi@supsi.ch), SUPSI, DACD, ISAAC-TISO, *Canobbio*: a) **Centrale di test ISAAC-TISO: Qualità e resa energetica di moduli fotovoltaici** (JB) • b) **PERFORMANCE – ISAAC Activities** (JB) <http://www.pv-performance.org> / www.isaac.supsi.ch.
- [13] W. Durisch, (wilhelm.durisch@psi.ch), PSI, *Villigen*: a) **Wirkungsgrad und jährliche Stromproduktion von Photovoltaikmodulen** (JB, SB Projekt 101'431) b) **FULLSPECTRUM: A new PV wave making more efficient use of the solar spectrum** <http://www.fullspectrum-eu.org/> / <http://www.psi.ch/>
- [14] H. Häberlin, (heinrich.haeberlin@bfh.ch), BERNER FACHHOCHSCHULE, *Burgdorf*: **Photovoltaik Systemtechnik 2007–2010 (PVSYSSTE 07-10)** (JB) <http://www.pvtest.ch>.
- [15] P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), ENECOLO, *Mönchaltorf*: a) **Solar Inverter mit integriertem BackUp SIMIBU** (JB) • b) **PV-BUK – Betriebs- und Unterhaltskosten von PV-Anlagen** (JB) • c) **ENVISOLAR – Environmental Information Services for Solar Energy Industries** (SB, siehe [45]) <http://www.envisolar.com> / <http://www.solarstrom.ch>.
- [16] P. Gaillard, (pgaillard@maxwell.com), MAXWELL TECHNOLOGIES, *Rossens*: **SOS-PVI: Security of Supply Photovoltaic Inverter** (JB) <http://www.maxwell.com>
- [17] N. Jungbluth, (jungbluth@esu-services.ch), ESU-SERVICES, *Uster*: a) **Update Photovoltaics in view ofecoinvent data v2.0** (JB, SB Projekt 101'805) • b) **Schweizer Beitrag IEA PVPS Programm Task 12 – Umwelt-, Sicherheits- und Gesundheitsaspekte** www.esu-services.ch.
- [18] A. Schüler, (andreas.schueler@epfl.ch), EPFL – LESO-PB, *Lausanne*: **Evaluation du potentiel de concentrateurs à Quantum Dots pour la production d'électricité photovoltaïque** (JB, SB Projekt 101'806) <http://lesowww.epfl.ch>.
- [19] R. Durot, (r.durot@zagsolar.ch), ZAGSOLAR, *Kriens*: **Center of competence for building integrated solar installations** (JB) <http://www.zagsolar.ch>
- [20] A. Borschberg, (andre.borschberg@solarimpulse.com), SOLAR IMPULSE, *Lausanne*: a) **Solarimpulse** <http://www.solarimpulse.com>. • b) **Ultralight Photovoltaic Structures**
- [21] R. Domjan, (info@planetsolar.org), PLANETSOLAR, *Neuchâtel*: **PlanetSolar** <http://www.planetsolar.org/>.
- [22] L. Palmer, (solartaxi@gmail.com) **Solartaxi** <http://www.solartaxi.com>
- [23] P. Hüsler, (pilus.huessler@novaenergie.ch), NOVA ENERGIE, *Aarau*: **Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Programm – Task 1** (JB) www.iea-pvps.org / <http://www.novaenergie.ch/>.
- [24] Th. Nordmann, (nordmann@tnc.ch), TNC CONSULTING, *Erlenbach*: **IEA PVPS Programm Task 2 Schweizer Beitrag 2007** (JB) <http://www.tnc.ch>.
- [25] S. Nowak, (stefan.nowak@netenergy.ch), NET, *St. Ursen*: a) **REPIC: Renewable Energy Promotion in International Co-operation** (JB) <http://www.repic.ch> • b) **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)** (JB) <http://www.pv-era.net> / <http://www.netenergy.ch>.
- [26] P. Renaud, (pierre.renaud@planair.ch), Planair, *La Sagne*: **IEA PVPS Task 10 – Swiss contribution** (JB) <http://www.planair.ch>.
- [27] H. Barth, *Sputnik, Biel*: **IEA PVPS Task 11 : Hybride Photovoltaik Systemen in Mininetzen**
- [28] J. Remund, (remund@meteotest.ch), METEOTEST, *Bern*: **IEA SHC Task 36: Solar resource knowledge management** (JB) <http://www.meteotest.ch>.
- [29] P. Ineichen, (pierre.ineichen@cuepe.unige.ch), CUEPE, *Genève*: **Solar Resource Management, IEA Solar Heating & Cooling Programme, Task 36** <http://www.unige.ch/cuepe>.
- [30] M. Real, (alphareal@access.ch), SWISSOLAR, *Zürich*: **Normenarbeit für PV Systeme** (JB) <http://www.swissolar.ch>.

Liste der P+D – Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer)

Einzelne Jahresberichte und Schlussberichte können von <http://www.photovoltaic.ch> heruntergeladen werden. Unter den aufgeführten Internet-Adressen sind weitergehende Informationen vorhanden.

- [31] D. Chianese, (domenico.chianese@supsi.ch), SUPSI, DACD, ISAAC-TISO, *Canobbio*: a) **Flat roof integration CPT solar** (JB, SB Projekt 100'493) • b) **Degradations- und Annealingverhalten von Modulen mit amorphen Zellen** <http://www.isaac.supsi.ch>.
- [32] P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), ENECOLO, *Mönchaltorf*: a) **Praxistest Backup Wechselrichter** • b) **Dachintegration mit amorphen Dünnschichtzellen Turnhalle Wiesendangen** (JB) <http://www.solarstrom.ch>.
- [33] P. Goulpié, (pascal.goulpie@flexcell.com), VHF-TECHNOLOGIES, *Yverdon*, **Toiture expérimentale 2kW Flexcell** (JB) <http://www.flexcell.ch>
- [34] Th. Böhni, (boehni@euu.ch), BÖHNI ENERGIE UND UMWELT, *Frauenfeld*: **Nullenergieschulhaus Heilpädagogisches Zentrum Ekkharthof Kreuzlingen** (JB) <http://www.euu.ch>.
- [35] Ch. Meier, (info@energieburo.ch), ENERGIEBÜRO, *Zürich*: **Preparation and Realisation of the Test- and Pilot Installation SOLIGHT** (JB) <http://www.energieburo.ch>.
- [36] Th. Hostettler (Hostettler_Engineering@Compuserve.com), INGENIEURBÜRO HOSTETTLER, *Bern*: a) **Messkampagne Wittgkofen** • b) **Photovoltaic Energy Statistics of Switzerland 2006** (JB)

- [37] U. Muntwyler, (muntwyler@solarcenter.ch), MUNTWYLER ENERGIETECHNIK, Zollikofen: **Autonome Stromversorgung mit Photovoltaik und Brennstoffzellen** <http://www.solarcenter.ch>.
- [38] P. Schudel, (info@benetz.ch), BE NETZ, Luzern: **17.6 kWp Installation with Thin-Film-Modules on the Flat Roof at the CNB-Building of the ETHZ** (JB, SB Projekt 100'176) <http://www.benetz.ch>.
- [39] R. Durot, (r.durot@zagsolar.ch), ZAGSOLAR, Kriens: **Photovoltaic- Façade, Mounting System for Thin-Film-Modules** (JB) <http://www.zagsolar.ch>.

Referenzen

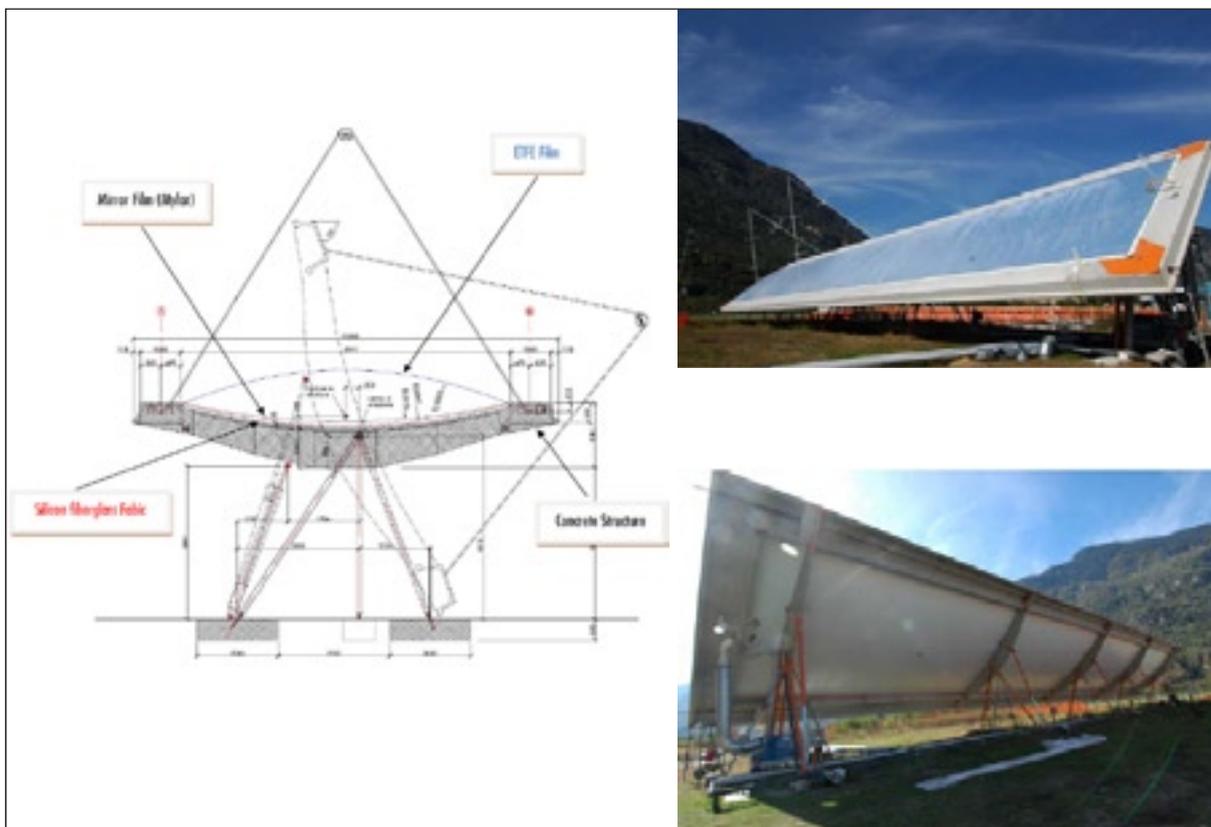
- [40] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 bis 2007**, Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, 2004, <http://www.energieforschung.ch>.
- [41] **Forschungskonzept Photovoltaik 2004 – 2007**, Bundesamt für Energie, 2005, <http://www.photovoltai.ch>.
- [42] **Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology**, The European Photovoltaic Technology Platform, 2007, http://www.eupvplatform.org/fileadmin/Documents/PVPT_SRA_Complete_070604.pdf
- [43] **Qualitätsanforderungen an PV-Module**, Willi Vaassen, TÜV Rheinland, 2008, Vortrag 12. Fachkongress Zukunftsenergien, NRW, <http://www.energieagentur.nrw.de/database/data/datainfopool/FK2008-B3Vaassen.pdf>
- [44] **Ecoinvent** Datenbank, <http://www.ecoinvent.org>
- [45] <http://www.envisolar.com>, http://www.envisolar.com/factsheets/Envisolar_brochure.pdf
- [46] <http://www.spyce.ch>.
- [47] **Annual Report 2007**, IEA PVPS, 2008, <http://www.iea-pvps.org/>.
- [48] **National Survey Report on PV Power Applications in Switzerland 2006**, P. Hüsser, (pilus.huesser@novaenergie.ch), Nova Energie, Mai 2007.
- [49] **Trends in Photovoltaic Applications in selected IEA countries between 1992 and 2006**, IEA PVPS Task 1–16:2007, <http://www.iea-pvps.org>.
- [50] **Nachhaltigkeitsstudie – Solarenergie 2007**, M. Fawer-Wasser, Sarasin, November 2007
- [51] **Workshop PVPS@PVSEC-17- Status of PV in the Asia-Pacific Region**, 6th December 2007, Fukuoka, Japan, <http://www.iea-pvps.org/>
- [52] **IEA PVPS Newsletter**, zu beziehen bei Nova Energie, Schachenallee 29, 5000 Aarau, Fax 062 834 03 23, (pilus.huesser@novaenergie.ch).
- [53] <http://www.iea-pvps.org>
- [54] **Performance Database**, IEA PVPS Task 2, May 2007, download: <http://www.iea-pvps-task2.org>
- [55] **Cost and Performance Trends in Grid-connected Photovoltaic Systems and Case Studies**, Report IEA-PVPS Task 2-06:2007, December 2007, <http://www.iea-pvps-task2.org>.
- [56] **Long-Term Reliability of Photovoltaic Systems, Deutschland und Österreich**, Report IEA-PVPS Task 2, <http://www.iea-pvps-task2.org>.
- [57] **User Perceptions of Photovoltaic System Performance, Japan**, Report IEA-PVPS Task 2, <http://www.iea-pvps-task2.org>.
- [58] **Performance Prediction of Grid-connected Photovoltaic Systems Using Remote Sensing, Kanada und Frankreich**, Report IEA-PVPS Task 2, <http://www.iea-pvps-task2.org>.
- [59] <http://www.repic.ch>
- [60] <http://www.pvupscale.org>
- [61] **Country Specific Added Value Analysis of PV Systems**, IEA PVPS Task 10-02-2008, January 2008, <http://www.iea-pvps.org>
- [62] **Urban BIPV in the New Residential Construction Industry**, IEA PVPS Task 10-03-2008, January 2008, <http://www.iea-pvps.org>
- [63] **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>
- [64] **Schweizer Nationalkomitee – Technische Fachkommission TK 82**, Kontakt: Electrosuisse, Sekretär des TK 82, Herrn Josef Schmucki (Josef.Schmucki@electrosuisse.ch, 044 956 11 74), Vorsitzenden des TK 82, Herrn Peter Toggweiler (Peter.Toggweiler@enecolo.ch, 044 994 90 01).
- [65] http://ec.europa.eu/research/fp6/index_en.cfm?p=9_eranet.
- [66] <http://www.eupvplatform.org>.
- [67] **European Strategic Energy Technology Plan (SET Plan)**, http://ec.europa.eu/energy/res/setplan/index_en.htm
- [68] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011**, Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, 2007, <http://www.energieforschung.ch>.
- [69] **Die 22th European Photovoltaic Solar Energy Conference & Exhibition Mailand 03. – 07.09.2007 aus Schweizer Sicht**, zu beziehen bei der Programmleitung Photovoltaik, c/o NET, Waldweg 8, 1717 St. Ursen, info@netenergy.ch, <http://www.photovoltai.ch>.

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

PROGRAMME UTILISATION INDUSTRIELLE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

Pierre Renaud

pierre.renaud@planair.ch



Coupe transversale du concentrateur solaire ALE Airlight Energy

Le collecteur à concentration aura une configuration linéaire. Celui-ci exploite un concept révolutionnaire basé sur un miroir flexible pneumatique. Les membranes sont fixées sur leur bord par un simple cadre en béton préfabriqué et précontraint. Photos : en haut à droite, le prototype pendant la construction et les essais auprès de l'installation *AirLight Energy* à Biasca ; en bas à droite, vue de l'arrière du prototype.

Centres de gravité du programme et buts fixés

Les processus solaires à haute température concernent la thermochimie solaire, la chaleur solaire dans les processus industriels ainsi que les centrales solaires thermiques. Ces processus ont en commun le fait qu'ils fonctionnent à des températures supérieures à 100 °C.

Concernant la **thermochimie solaire** (dans le programme de recherche en question, seule la production de matériaux purs comme le zinc est traitée et non pas la production d'hydrogène), un des objectifs est de stocker et de transporter facilement l'énergie solaire. La filière prioritaire de la recherche dans ce domaine en Suisse est la production de zinc par cycle thermochimique ZnO/Zn menée par le *Paul Scherrer Institut (PSI)*. Le domaine de la **chaleur solaire à haute température dans les processus industriels** vise à mettre en place des systèmes qui permettent l'intégration de l'énergie solaire dans les processus

de production traditionnels, la combinaison du solaire avec des processus de récupération de chaleur, la valorisation des rejets de chaleur à basse température, l'utilisation maximale de l'énergie solaire et, par conséquent, la réduction de l'intensité en CO₂ de l'énergie utilisée. Les **centrales solaires thermiques** représentent incontestablement une source d'électricité renouvelable appelée à avoir un développement substantiel dans les années à venir. Au niveau de la recherche et des installations pilotes, beaucoup reste à faire pour améliorer les technologies existantes (système parabolique linéaire, système de Fresnel linéaire, centrale à tour et système parabole / moteur de Stirling) ainsi que chaque composante de la centrale (héliostat, concentrateurs, échangeurs de chaleur, turbines, régulation, technologie de concentration, ingénierie, logiciels, etc.).

Travaux effectués et résultats acquis pour 2007

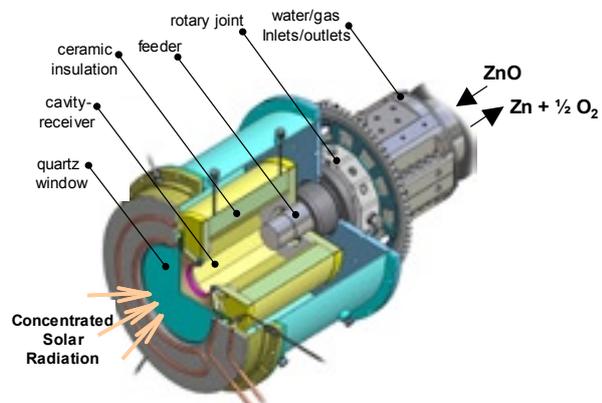
THERMOCHIMIE SOLAIRE [1]

Langfristige Forschungsziele des Labors für Solartechnik (LST) am 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 mit der endothermen solarthermischen Dissoziation von Zinkoxid (ZnO) zu Zink (Zn) und Sauerstoff (O₂) sowie der nicht-solaren exothermen Hydrolyse von Zn zu Wasserstoff (H₂) und ZnO, welches anschliessend wieder dem solaren Prozess zugeführt wird.

a) Solarchemische Herstellung von Wasserstoff mittels Zinkoxid/Zink-Kreisprozess

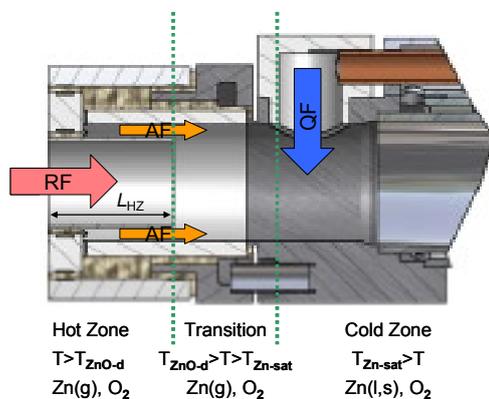
Der erste Schritt des Zinkoxid/Zink-Kreisprozesses wurde am PSI im eben abgeschlossenen Projekt **Solar Thermal Production of Zinc – Final Steps Toward Scale-Up** [4] erforscht und soll im Nachfolgeprojekt **Towards Industrial Solar Production of Zinc – Reactor Optimization and Scale-Up** [5] in einer 100-kW-Pilotanlage demonstriert werden. Ein rotierender 10-kW-Hochtemperatur-Solarreaktor wurde mit einer Mehrschicht aus keramischen Materialien ausgekleidet, die sich im bisherigen Verlauf als thermisch stabil und korrosionsbeständig erwies (Fig. 1). Vorgeheiztes Inertgas (Argon) wurde eingedüst, um das Quarzfenster vor Verunreinigung durch Zinkablagerungen zu schützen und die Rückreaktion der Produktgase Zn(g) und O₂ in der Kavität zu minimieren. Im Hochfluss-Solar-simulator des PSI (HFSS) [12] wurde der Reaktor während mehr als 40 Stunden maximalen Strahlungsflüssen von über 5800 Sonnen (1 Sonne entspricht 1 kW/m²) und Temperaturen von über 2000 K ausgesetzt. Einzelne Experimente liefen während mehr als vier Stunden ununterbrochen, wobei mehrmals frische ZnO-Partikel nachgefördert wurden. Die Zersetzungsrate betrug etwas mehr als 1 g ZnO/min, und die stromabwärts in einem Filter aufgefangenen Partikel wiesen einen Zinkgehalt von bis zu 40% auf [13]. Die gesamte Zinkausbeute betrug 16-18% für Zinkpartialdrücke zwischen 900 und 2100 Pa. Höhere Zinkausbeuten sind zu erwarten, wenn das Verdünnungsverhältnis von Ar zu Zn(g) in der Reaktorkavität vergrößert oder die Abkühlrate in der Quench-Einheit erhöht wird [14]. Die Trennung von Zn(g) und O₂ bei hohen Temperaturen bleibt weiterhin eine technologische Herausforderung. Rasches Abkühlen, sogenanntes «*Quenching*», ist zwar thermodynamisch ineffektiv, aber wegen seiner Einfachheit die bevorzugte Option [15].

lungsfüssen von über 5800 Sonnen (1 Sonne entspricht 1 kW/m²) und Temperaturen von über 2000 K ausgesetzt. Einzelne Experimente liefen während mehr als vier Stunden ununterbrochen, wobei mehrmals frische ZnO-Partikel nachgefördert wurden. Die Zersetzungsrate betrug etwas mehr als 1 g ZnO/min, und die stromabwärts in einem Filter aufgefangenen Partikel wiesen einen Zinkgehalt von bis zu 40% auf [13]. Die gesamte Zinkausbeute betrug 16-18% für Zinkpartialdrücke zwischen 900 und 2100 Pa. Höhere Zinkausbeuten sind zu erwarten, wenn das Verdünnungsverhältnis von Ar zu Zn(g) in der Reaktorkavität vergrößert oder die Abkühlrate in der Quench-Einheit erhöht wird [14]. Die Trennung von Zn(g) und O₂ bei hohen Temperaturen bleibt weiterhin eine technologische Herausforderung. Rasches Abkühlen, sogenanntes «*Quenching*», ist zwar thermodynamisch ineffektiv, aber wegen seiner Einfachheit die bevorzugte Option [15].



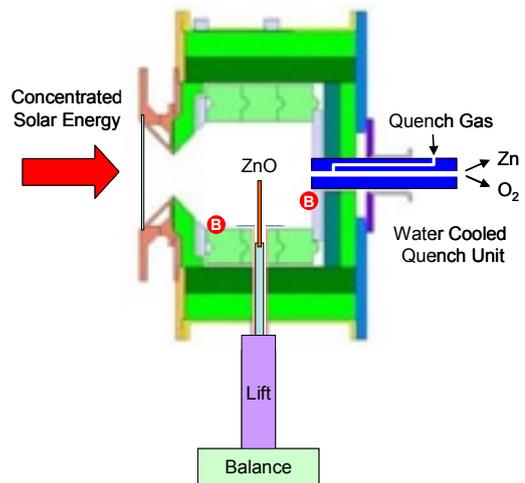
Figur 1: Schema des 10 kW Prototypreaktors für die solarthermische Dissoziation von ZnO in Zn und O₂.

Im Projekt **Solarthermische Beiträge zur Reduktion des CO₂-Ausstosses** [6] wurde eine Quench-Apparatur entwickelt und fabriziert, welche eine effiziente und technisch realisierbare Separation des Zinkdampfs von den restlichen Gasen am Ausgang des Solarreaktors erlaubt (Fig. 2). Experimente wurden in einem sogenannten solaren Thermogravimeter durchgeführt, wobei dessen Ausgang mit dem Eingang der Quench-Apparatur verbunden war (Fig. 3). ZnO-Proben wurden direkt der konzentrierten Strahlung im HFSS ausgesetzt und die Dissoziationsrate wurde mit einer Waage online gemessen. Die Ringströmung («Annular flow», AF) funktionierte gut und verhinderte Ablagerungen in der Übergangszone vom heissen zum kalten Teil der Quench-Apparatur. Die Zinkausbeute betrug bis zu 94% bei einer Verdünnung des Zinkgases mit Argon um den Faktor 530 und einer Abkühlrate von etwa 100'000 K pro Sekunde [16]. Die Quenchraten wurden mit Hilfe von numerischen Strömungssimulationen (CFD) abgeschätzt. Die Resultate dieser Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Herstellung von Zink in einem kontinuierlichen solaren Prozess technisch möglich ist, indem die Rückreaktion von Zink und Sauerstoff durch effizientes Abkühlen der gasförmigen Produkte verhindert wird.



Figur 2: Schematische Darstellung der Quench-Apparatur mit drei Temperaturzonen (RF: «reacting flow» von Zn(g) und O₂ im Trägergas Ar; AF: «annular flow»; QF: «quench flow»; L_{HZ}: heisse Zone mit variabler Länge) [11].

Im Rahmen des CCEM-Projekts **Transition to Hydrogen Based Transportation** [7] wurde eine Lebenszyklusanalyse (LCA) durchgeführt [17]. Umwelteinflüsse und Wirtschaftlichkeit der solaren Wasserstoffproduktion mittels ZnO/Zn-Kreisprozess wurden verglichen mit konventionellen Herstellungsverfahren und alternativen Wegen, die auf der Elektrolyse von Wasser unter Verwendung von Strom aus solarthermischen Kraftwerken, Photovoltaik, Wind und Wasserkraft basieren [18]. Die Studie berücksichtigte Herstellung, Transport und Gebrauch von Wasserstoff



Figur 3: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus mit dem solaren Thermogravimeter und der Quench-Apparatur. Für die Temperaturmessungen wurden Thermolemente des Typs B verwendet [11].

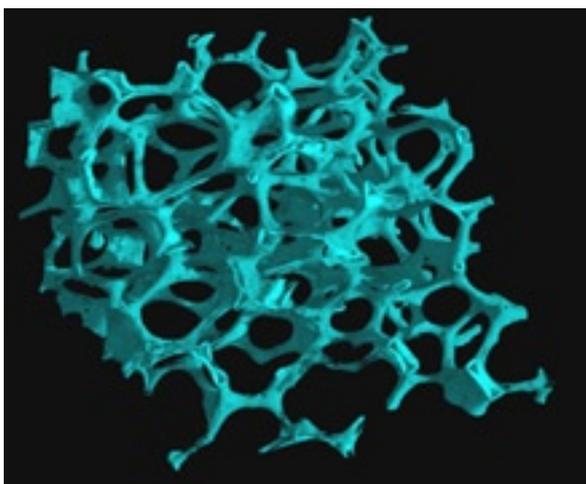
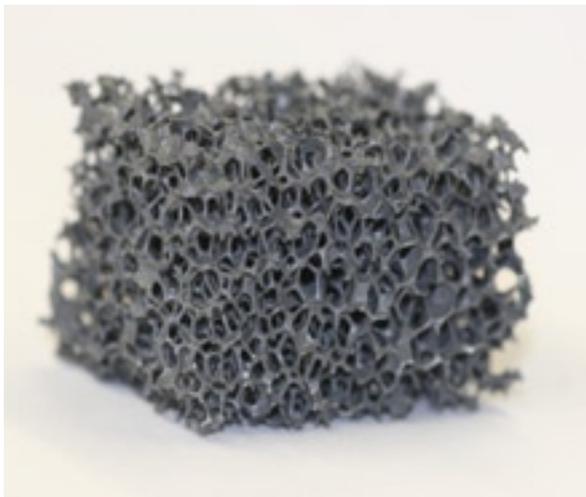
in zukünftigen Brennstoffzellenfahrzeugen. Die Verwendung von solarem Wasserstoff reduziert Treibhausgasemissionen um 94% im Vergleich zu Benzin, beziehungsweise um 70%, wenn Fahrzeug- und Strasseninfrastruktur einbezogen werden. Die relativ hohen Investitionen für die Spiegelfelder von Solarkraftwerken sowie die langen Transportwege von sonnenreichen Gebieten (z.B. Südspanien) in die Schweiz verteuern die Produktions- und Verteilungskosten für solaren Wasserstoff um einen Faktor 2.5 bis 5.5 verglichen mit der konventionellen Methanreformierung, die etwa 4 USD/kg H₂ im Fahrzeugtank kostet [19]. Die gesamten Kilometerkosten dürften für ein mit solarem Wasserstoff betriebenes Brennstoffzellenfahrzeug etwa 0.20-0.25 USD/km höher sein als für ein benzinbetriebenes Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Die betrachteten solaren Wasserstofftechnologien weisen eine tiefe Öko-Effizienz auf, da im Allgemeinen deren vergleichsweise hohe Kosten nicht durch die Umweltvorteile ausgeglichen werden, ausser ökologische Aspekte würden stärker gewichtet als wirtschaftliche.

b) Solarthermische Herstellung von Wasserstoff und Synthesegas aus fossilen Rohstoffen

Im Rahmen des EU-Projekts **SOLHYCARB** [8] wurde ein solarchemischer 5-kW-Reaktor zur Koproduktion von Wasserstoff und hochwertigem Kohlenstoff («carbon black») mittels thermischer Zersetzung von Methan (CH₄) im Solarofen des PSI und im Solarsimulator an der ETH-Zürich getestet, wobei die Hochtemperaturprozesswärme durch konzentrierte Strahlung bereitgestellt wurde [20]. Im Solarreaktor wurde ein mit Kohlepartikeln (Aktivkohle und «carbon black») beladener Methangasstrom direkt bestrahlt, wobei die Partikel als Strahlungsabsorber und Nukleationskeime für die heterogene chemische Reaktion dienen.

In insgesamt 36 Experimenten wurden für fünf Typen von Kohlepartikeln die wichtigsten Betriebsparameter variiert, nämlich der solare Leistungseintrag (2.23-4.48 kW) sowie die Massendurchsatzraten von Partikeln (0.66-4.08 g/min) und CH_4 (9.3-14.7 L_N /min). Die maximale Wasserstoffausbeute betrug 59.5% bei einer Reaktionstemperatur von 1450 K.

Beim EU-Projekt **SOLREF** [9] soll die solare Dampfreformierung von Methan für verschiedene Anwendungen wie Wasserstoffproduktion oder Stromerzeugung in einer 400-kW-Pilotanlage demonstriert werden. An der ETH-Zürich wurde ein detailliertes Modell zur Simulation von Transportphänomenen und chemischen Reaktionen im schwammartigen keramischen Absorbermaterial entwickelt (Fig. 4), welches auf einer neuartigen Methode basierend auf der Computertomographie beruht [21, 22].



Figur 4: Oben: Foto einer 30 x 35 x 43 mm³ grossen kubischen Probe des schwammartigen keramischen Absorbermaterials, deren verästelte poröse Form mittels Computertomographie eingescannt wurde. Unten: Digitale 3D-Oberflächendarstellung eines 15 x 15 x 9 mm³ Ausschnitts des Keramikstücks [19].

In einem von der ETH-Zürich initiierten Industrie-projekt **SynPet** [10] wird durch solare Vergasung von Schwerölderivaten («*Petcoke*» oder «*petroleum coke*») ein hochwertiges Synthesegas hergestellt, welches entweder für die Stromerzeugung in Kombikraftwerken genutzt oder durch weitere Verarbeitungsschritte in Wasserstoff für die Anwendung in Brennstoffzellenfahrzeugen umgewandelt werden kann. Die Inbetriebnahme einer 500-kW-Pilotanlage im europäischen Testzentrum *Plataforma Solar de Almería (PSA)* in Südspanien ist nun für Anfang 2008 geplant, nachdem es bei der Herstellung von peripheren Komponenten wie Förder- und Gasreinigungssystemen zu Lieferverzögerungen kam (Fig. 5). Der von der ETH-Zürich entwickelte Solarreaktor ist bereits seit Anfang 2007 betriebsbereit.

Neben «*Petcoke*» [23] wurden weitere Schwerölrückstände («*vacuum residue*» genannt) im Hochfluss-Solarofen des PSI experimentell untersucht [24]. Das bei 423 K verflüssigte Rohmaterial wurde kontinuierlich in den 5-kW-Solarreaktor eingespritzt und bei Temperaturen von 1420-1567 K mittels kombinierter Pyrolyse und Dampfvergasung zersetzt. Die chemische Umwandlung erfolgte zu 50% bei 1472 K, wobei ein qualitativ hochstehendes Synthesegas mit einer Zusammensetzung von 68% H_2 , 15% CO , 14% CO_2 , und 2% CH_4 produziert wurde.

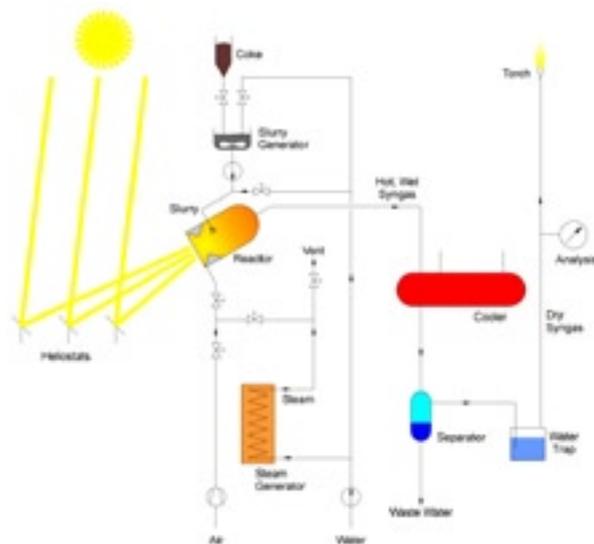


Figure 5 : Schema der solarchemischen Reaktorkonfiguration und des experimentellen Aufbaus für die Demonstration der Dampfvergasung von Schwerölrückständen im 500 kW Massstab auf der *Plataforma Solar de Almería*, Spanien.

Im Rahmen des EU-Projekts **SOLZINC** [11] wurde mit massgeblicher Schweizer Beteiligung (PSI, ETHZ) der karbothermische ZnO/Zn -Prozess in einer Pilotanlage mit 300 kW solarer Leistung erfolgreich getestet. Das Konsortium aus akade-

mischen und industriellen Partnern ist weiterhin bestrebt, diesen viel versprechenden Prozess in einer 5-MW-Solaranlage zu demonstrieren [25].

CHALEUR SOLAIRE À HAUTE TEMPÉRATURE DANS LES PROCESSUS INDUSTRIELS

Das Projekt *Aufwertung von Abwärme mittels Solarthermie zur Erzeugung hochwertiger Prozessenergie* [2] soll die generellen Anforderungen an die industrielle Abwärmenutzung mit solarthermischer Temperaturhebung identifizieren und die Umsetzung anhand einer konkreten Anwendung durchführen. Als Resultate sollen eine detaillierte Kosten-Nutzenanalyse sowie eine allgemeine Checkliste zur erfolgreichen Umsetzung gleicher Projekte in anderen Industrien vorliegen. Die verfahrenstechnischen Aspekte werden durch *BMG Engineering AG* betrachtet, die solartechnischen Aspekte durch das Institut für Solartechnik SPF der Hochschule für Technik Rapperswil HSR. Die Anlage wird für *Novartis Consumer Health S.A., Nyon*, ausgelegt.

Im Jahr 2007 wurde die Organisation des Projekts aufgebaut und die notwendige Vorarbeit gestartet. Dies beinhaltet die Koordination der verschiedenen Parteien (BFE, *Novartis*, *BMG*, SPF) sowie die vertragliche Regelung der Zusammenarbeit. Im Dezember 2007 wurde das Kick-Off Meeting bei *BMG Engineering AG* durchgeführt, an dem alle involvierten Personen teilnahmen. Die technische Projektarbeit beginnt im Januar 2008. Dieses Projekt fand bereits in dieser frühen Phase grosse Beachtung innerhalb des *Novartis Konzerns*. Es erhielt im Rahmen der *Novartis Energy Excellence Awards 2007* eine ‚special recognition‘. Diese Awards sind noch nicht veröffentlicht, das entsprechende Dokument für das Jahr 2006 ist erhältlich [26].

CENTRALES SOLAIRES THERMIQUES

Le projet *SOLAIR* [3] vise l'investigation de l'ingénierie et la conception d'un système de collecteur à concentration solaire novateur pour une production d'énergie solaire thermique efficace et rentable. Cette technologie exploite une structure de réflexion révolutionnaire gonflable pour concentrer le rayonnement solaire.

a) Conception du récepteur

Le concentrateur du collecteur à concentration *AirLight Energy* a une forme parabolique et non pas cylindrique. Cela fait que l'énergie solaire concentrée est projetée sur un plan plutôt que sur une ligne. Par conséquent, les tubes récepteurs classiques ne sont pas très appropriés et les études pour un concept spécifique de récepteur sont en cours.

Avec les simulations des dynamiques thermo-fluides, l'élévation de la température de l'eau le long

des tubes et l'échange de chaleur avec le milieu récepteur ont été explorés afin d'estimer l'efficacité du système et les pertes d'énergie thermique. Un exemple des résultats de l'analyse *CDF* est présenté dans la figure 6. Les simulations ont montré l'efficacité de la vitre d'isolation contre les pertes de chaleur par convection. En particulier, dans la région fermée du récepteur entre la vitre et les tubes, l'air stagnant forme une région isolante stratifiée, ce qui réduit l'échange thermique convectif. Sur la face arrière, les tubes sont plutôt abrités par la couche d'isolant, qui maintient faible la température de surface du récepteur et l'échange de chaleur conséquent avec le milieu extérieur. Les effets de l'échange de chaleur par convection peuvent être vus dans les figures 7 et 8, où les champs de vitesse de l'air et de température autour du dispositif sont illustrés.

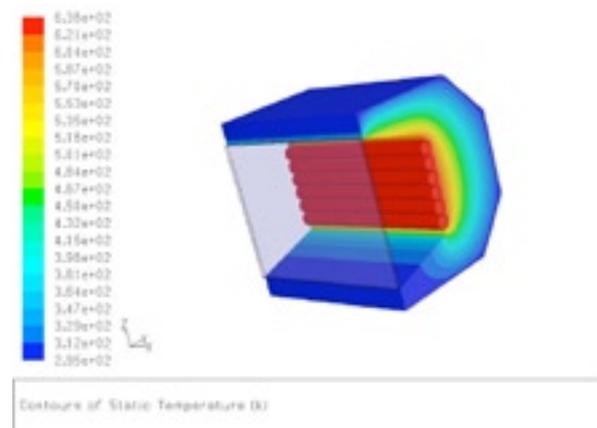


Figure 6 : champ de température obtenu avec une simulation des dynamiques thermo-fluides du récepteur. À noter, l'effet de la présence de matériau isolant, qui permet de garder basse la température du récepteur superficiel, même lors d'une très haute température des tubes.

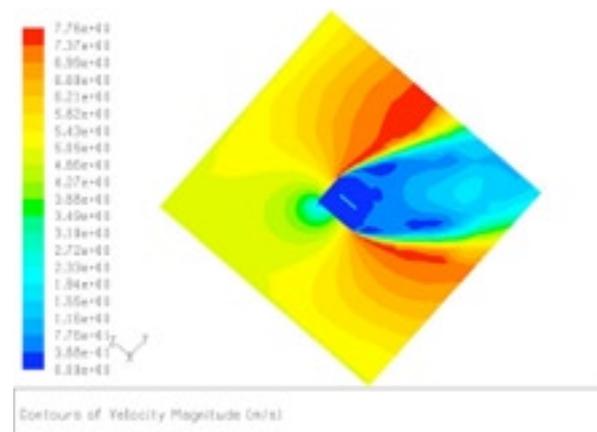


Figure 7 : champ de vitesse pour le récepteur exposé à des conditions de vent. Le flux d'air va de la gauche vers la droite.

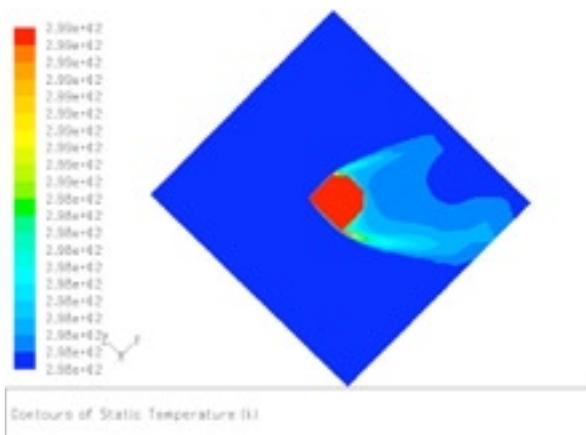


Figure 8 : champ de température de l'air investissant le récepteur dans des conditions de vent moyennes. Le flux d'air va de la gauche vers la droite.

b) Mesure du flux solaire

Le prototype de collecteur à concentration solaire linéaire *AirLight Energy* est caractérisé optiquement. Les intensités radiatives du flux solaire sont mesurées avec une caméra CCD calibrée, en enregistrant l'image du soleil sur une plaque lam-

bertienne (à réflexion diffuse) revêtue d' Al_2O_3 et refroidie à l'eau placée dans le plan focal. Après avoir compensé la distorsion et corrigé l'image, les valeurs de gris de l'image sont directement proportionnelles aux flux radiatifs incidents, ce qui permet de déterminer un facteur d'étalonnage avec un radiomètre à point absolu de Kendall (figure 9).

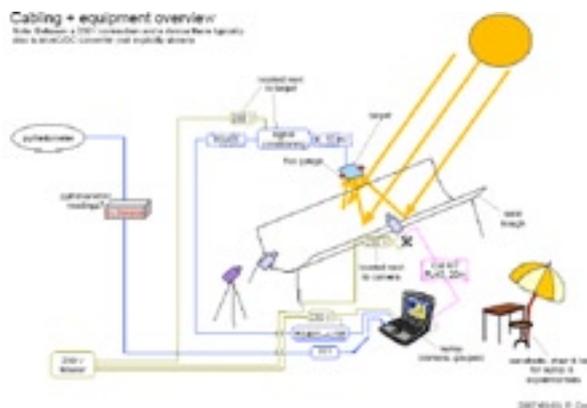


Figure 9 : configuration du système de détection de flux.

Collaboration nationale

THERMOCHIMIE SOLAIRE

Das Labor für Solartechnik (LST) am PSI und die Professur für Erneuerbare Energieträger (PRE) an der ETH-Zürich erforschen gemeinsam solar-chemische Hochtemperaturprozesse. Die beiden Labors sind aktiv im Rahmen des neu gegründeten **Competence Center Energy and Mobility (CCEM-CH)** 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

Le projet est une collaboration scientifique entre *Airlight Energy*, la SUPSI et l'EPFZ ; Pour la SUPSI, la collaboration est avec l'Institut pour les sciences informatiques appliquées pour le développement durable du Département des technologies novatrices ; pour l'EPFZ, avec l'Institut de la technologie énergétique du Département de la mécanique et génie des procédés.

Collaboration internationale

THERMOCHIMIE SOLAIRE

Die Forschung auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Solarchemie ist international eingebettet in das **SolarPACES Implementing Agreement** der IEA – International Energy Agency (Operating Agent Task II – Solar Chemistry Research: Dr. A. Meier, PSI), in **IPHE – International Partnership for the Hydrogen Economy** (Projekt **Solar Driven High**

Temperature Thermochemical Production of Hydrogen), und **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 2007 et perspectives pour 2008

Au cours de l'année 2007, la recherche dans le domaine de la thermochimie solaire et notamment de la production de zinc par cycle thermochimique ZnO/Zn a progressé de façon satisfaisante grâce aux projets menés par le *Paul Scherrer Institut (PSI)*. Un des points forts de l'année 2007 a été l'implémentation du programme de recherche aux domaines de la chaleur solaire à haute température dans les processus industriels et des centrales solaires thermiques avec chacun un projet cofinancé par l'OFEN. Le premier vise la mise en place de systèmes permettant l'intégration de l'énergie solaire dans les processus de production traditionnels, en impliquant directement l'industrie. Le deuxième propose le développement d'un système de collecteur à concentration solaire novateur et très concurrentiel par rapport aux technologies existantes.

En 2008, la recherche fondamentale continuera d'occuper une place importante dans le domaine de la thermochimie solaire. En parallèle, une transition vers la recherche appliquée aura lieu avec la mise en place, dans un premier temps, d'un prototype (10 kW) pour la dissociation de l'oxyde de zinc et la production de zinc. D'autre part, dans les domaines de la chaleur solaire à haute température pour les processus industriels et des centrales solaires thermiques, la recherche appliquée sera encore développée, notamment dans le but de proposer des solutions novatrices techniquement et économiquement viables. Les acteurs privés ainsi que les industries devront jouer un rôle important à côté des collectivités publiques dans le financement des projets.

Liste des projets de R+D

(RA) Rapport annuel 2007 existant

(RF) Rapport final existant (voir www.recherche-energetique.ch sous le numéro de projet indiqué)

Certains rapports annuels peuvent aussi être téléchargés à partir du site internet mentionné.

- [1] A. Meier (anton.meier@psi.ch), *Programm Industrielle Solarenergienutzung* (RA), PSI – Labor für Solartechnik (<http://solar.web.psi.ch>), Januar 2008.
- [2] R. Müller (reto.mueller@bmeng.ch), *Solarthermische Abwärmenutzung – Aufwertung von Abwärme mittels Solarthermie zur Erzeugung hochwertiger Prozessenergie* (RA), BMG Engineering AG (www.bmeng.ch), Januar 2008.
- [3] M.C Barbato, Ph. Haueter, P. Coray, A. Steinfeld, A. Pedretti, *SOLAIR – Innovative solar collectors for efficient and cost-effective solar thermal power generation* (RA), ALE Airlight Energy SA, Janvier 2008.
- [4] R. Palumbo, A. Meier, *Solar Thermal Production of Zinc – Final Steps Toward Scale-up* (RF), BFE-Projekt Nr. 101'050, 2005-2007.
- [5] A. Meier, A. Steinfeld, *Towards Industrial Solar Production of Zinc – Reactor Optimization and Scale-Up*, BFE-Projekt Nr. 102'420, 2008-2011.
- [6] M. Sturzenegger, I. Alxneit, H.R. Tschudi, *Solarchemische Beiträge zur Reduktion des CO₂-Ausstosses* (RF), BFE-Projekt Nr. 43'708, 2004-2007.
- [7] Competence Center Energy and Mobility (CCEM-CH), Projekt *Transition to hydrogen based transportation*; www.ccem-ch.ch.
- [8] *Hydrogen from Solar Thermal Energy: High Temperature Solar Chemical Reactor for Co-production of hydrogen and carbon black from natural gas cracking* (SOLHYCARB), EU-Projekt Nr. 019770 (SES6), 2006-2010.
- [9] *Solar Steam Reforming of Methane Rich Gas as NG for Synthesis Gas Production* (SOLREF), EU-Projekt Nr. SES6-CT-2004-502829, 2004-2007.
- [10] *Solar Production of Syngas and Hydrogen by Steam-Gasification of Petroleum Coke* (SynPet), Industrie-Projekt der ETH Zürich, Professur für Erneuerbare Energieträger (PRE), 2003-2007; www.pre.eth.ch
- [11] *Solar Carbothermic Production of Zn from ZnO* (SOLZINC), EU-Projekt Nr. NNES-2000-00274, 2001-2005.

Références

- [12] Petrasch, J., Coray, P., Meier, A., Brack, M., Häberling, P., Wuillemin, D., Steinfeld, A. 2007, **A 50-kW 11,000-suns novel high-flux solar simulator based on an array of Xenon arc lamps**, J. Solar Energy Eng. **129**, 405-411.
- [13] Schunk, L.O., Häberling, P., Wepf, S., Wuillemin, D., Meier, A., Steinfeld, A., 2007, **A receiver-reactor for the solar thermal dissociation of zinc oxide**, J. Solar Energy Eng., in press.
- [14] Schunk, L.O., Gstoehl, D., Meier, A., Steinfeld, A., **Technological advances toward scale-up of solar chemical reactor for thermal ZnO decomposition**, Proc. 14th International Biennial SolarPACES Concentrating Solar Power Symposium, Las Vegas, Nevada, USA, March 4-7, 2008.
- [15] Müller, R., Steinfeld, A., 2007, **H₂O-splitting thermochemical cycle based on ZnO/Zn-redox: Quenching the effluents from the ZnO dissociation**, Chem. Eng. Sci. **63**, 217-227.
- [16] Gstoehl, D., Brambilla, A., Schunk, L., Steinfeld, A., 2007, **A quenching apparatus for the gaseous products of the solar thermal dissociation on ZnO**, J. Materials Science, in press.
- [17] Felder, R., 2007, **Well-to-Wheel Analysis of Renewable Transport Fuels: Synthetic Natural Gas from Wood Gasification and Hydrogen from Concentrated Solar Energy**, Ph.D. Thesis, ETH No. 17437, ETH Zurich, Switzerland.
- [18] Felder, R., and Meier, A., 2007, **Well-to-wheel analysis of solar hydrogen production and utilization for passenger car transportation**, J. Solar Energy Eng., in press.
- [19] Felder, R., Meier, A., Wokaun, A., **Solar hydrogen as future transportation fuel – well-to-wheel analysis and economic assessment**, Proc. 14th International Biennial SolarPACES Concentrating Solar Power Symposium, Las Vegas, Nevada, USA, March 4-7, 2008.
- [20] Maag, G., Gutierrez, F.J., Steinfeld, A., **Experimental investigation on the solar thermal decomposition of methane using a particle-flow reactor**, Proc. 14th International Biennial SolarPACES Concentrating Solar Power Symposium, Las Vegas, Nevada, USA, March 4-7, 2008.
- [21] Petrasch, J., Wyss, P., Steinfeld, A., 2007, **Tomography-based Monte Carlo determination of radiative properties of reticulate porous ceramics**, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer **105** (2), pp. 180-197.
- [22] Petrasch, J., Meier, F., Friess, H. M., Steinfeld, A., 2008, **Tomography based determination of permeability, Dupuit-Forchheimer coefficient, and interfacial heat transfer coefficient in reticulate porous ceramics**, Int. J. Heat and Fluid Flow **29** (1), pp. 315–326.
- [23] Z'Graggen, A., Haueter, P., Maag, G., Vidal, A., Romero, M., Steinfeld, A. 2007, **Hydrogen production by steam-gasification of petroleum coke using concentrated solar power – III. reactor experimentation with slurry feeding**, Int. J. Hydrogen Energy **32**, 992-996.
- [24] Z'Graggen, A., Haueter, P., Maag, G., Romero, M., Steinfeld, A. 2008, **Hydrogen production by steam-gasification of carbonaceous materials using concentrated solar energy—IV. Reactor experimentation with vacuum residue**, Int. J. Hydrogen Energy, in press.
- [25] Wieckert, C., Frommherz, U., Kräupl, S., Guillot, E., Olalde, G., Epstein, M., Santen, S., Osinga, T., Steinfeld, A., 2007, **A 300 kW solar chemical pilot plant for the carbothermic production of zinc**, J. Solar Energy Eng. **129**, 190-196.
- [26] Novartis: **Novartis Energy Excellence Awards 2006**, <http://www.corporatecitizenship.novartis.com/citizenship-in-action/energy-excellence-awards.shtml>

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

PROGRAMM BIOMASSE

Daniel Binggeli

daniel.binggeli@bfe.admin.ch

Bruno Guggisberg

bruno.guggisberg@bfe.admin.ch



Forschungslabor Bioenergie Horw

Das im 2007 etablierte Forschungslabor Bioenergie an der HTA in Horw startet mit Projekten in der Holzverbrennung und Strömungsvisualisierung.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

EINLEITUNG

Das Forschungsprogramm *Biomasse* konzentriert sich auf die effiziente Umwandlung von Biomasse in Wärme, Strom und Treibstoff. Es soll mithelfen, den Beitrag der Biomasse zur schweizerischen Energieversorgung stetig zu erhöhen. Einen grossen Einfluss haben auch die politischen Rahmenbedingungen und die begrenzten Ressourcen der Welt. Die Einführung der CO₂-Abgabe auf fossile Brennstoffe und die kostenbasierte Einspeisevergütung für Strom aus erneuerbaren Energien sowie der starke Anstieg aller Rohstoffe, insbesondere der Energieträger im internationalen Umfeld, bewegen den Energiemarkt zurzeit enorm. Diese Entwicklung gilt es bei der Ausarbeitung des nächsten Biomass-Forschungsprogramms, welches auf dem Konzept der Energieforschung des Bundes 2008-2011 basiert, zu berücksichtigen.

POTENZIAL UND HEUTIGE NUTZUNG

Zurzeit¹ stammen rund 83% des schweizerischen Endenergieverbrauchs aus nicht erneuerbaren Quellen (fossil und nuklear). Die Schweiz ist damit in starkem Masse vom Ausland abhängig. Zusätzlich ist an den Verbrauch fossiler Energieträger die CO₂-Problematik gekoppelt.

Biomasse kann vielfältig eingesetzt werden: als Brennstoff, als Treibstoff und zur Stromerzeugung. Gemäss Biomasse-Potenzialstudie² könnten gut 10% des heutigen Primärenergieverbrauchs³ ökologisch vertretbar mit Biomasse gedeckt werden. Damit könnte die Biomasse einen wichtigen Beitrag leisten zur

- a) Erreichung der CO₂-Reduktionsziele und der Ziele von EnergieSchweiz;
- b) Reduktion der Abhängigkeit von nicht erneuerbaren Energien;
- c) Versorgungssicherheit und inländischen, regionalen Wertschöpfung.

Die verfügbare Menge an Biomasse und damit das theoretische Potenzial ist in der Schweiz auf Grund der Landesgrösse und der klimatischen Verhältnisse beschränkt. Das unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte energetisch nutzbare Potential liege bei ca. **120 PJ**, wird jedoch lediglich zu knapp **40% (53 PJ)** energetisch genutzt (Figur 1).

Der Anteil der Biomasse am schweizerischen Endverbrauch erreichte 2006 rund 5.15% (thermisch und elektrisch). Dies entspricht einem Anteil am Endverbrauch der erneuerbaren Energien von

30% (Figur 2). Das mittelfristige politische Ziel des Bundes ist jedoch mindestens eine Verdoppelung der energetischen Nutzung von Biomasse.

GENERELLE ZIELE FÜR DIE BIOMASSENUTZUNG IN DER SCHWEIZ

Die heutige Biomasseforschung orientiert sich an folgenden Leitlinien:

- Energieträger Biomasse mit maximaler Substitutionswirkung (bezüglich fossil und nuklear) und minimaler Umweltbelastung einsetzen;
- möglichst hohe Ausnutzung der Energie (hohe Wirkungsgrade) bei gleichzeitig minimalen Emissionen der Gesamtkette;
- Bereitstellung von Nutzenergie mit hoher Wertigkeit (Exergie) wo möglich und sinnvoll;
- Förderung von möglichst einfachen und kostengünstigen Technologien mit hoher Verfügbarkeit;
- Schliessen von Stoffkreisläufen;
- Forschung und Entwicklung im Bereich neuer Technologien für die effiziente und umweltschonende Umsetzung von Biomasse.

PROGRAMMSCHWERPUNKTE

Das Forschungsprogramm musste in den letzten Jahren nicht zuletzt aus finanziellen Gründen stark fokussiert werden. Die primären Aktionsfelder liegen insbesondere dort, wo

- grosses Biomassepotenzial vorhanden ist;
- grosses Optimierungspotenzial zu erwarten ist;
- hohe Fachkompetenz / Know-how vorhanden ist (auch im Hinblick auf den Exportmarkt).

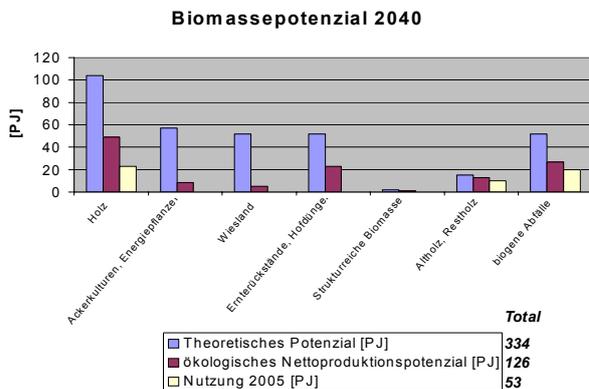
Als Schwerpunktsbereiche ergeben sich folglich **Holz** (mit den entsprechenden Technologien) und **Landwirtschaft** (anaerobe Vergärung). Bis 2007 werden die folgenden Schwerpunkte verfolgt:

- Verfahren optimieren (→ Wirkungsgrad, Emissionen); im Vordergrund: Reduktion Partikelemissionen bei Holzfeuerungen und Verbrennung anderer Biomasse;
- Stoffflüsse analysieren, optimieren; insbesondere landwirtschaftliche Biomasse und biogene Abfälle (→ nasse/wenig verholzte Biomasse in die Vergärung, Nährstoffabtrennung und Qualitätssicherung von Kompost/Gärgut);
- Entwicklung neuer effizienter Umwandlungstechnologien; Bsp.: hydrothermale Vergasung von Biomasse (inkl. verholzter Biomasse), KDV (katalytische drucklose Verölung);
- Grundlagen, Studien, Konzepte; im Vordergrund: Ökobilanz von Bio-Treibstoffen, Wirkung von Verbrennungspartikeln, Stromerzeugung aus Biomasse.

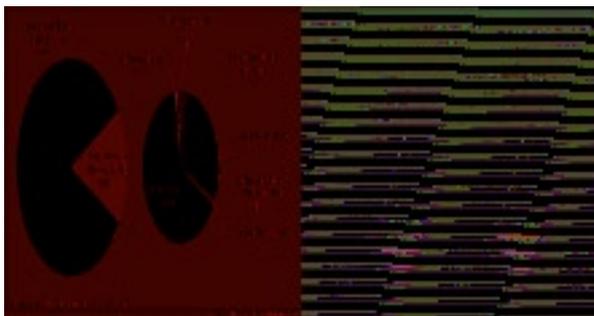
¹ Schweiz. Energiestatistik 2006

² Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz, BFE 2004

³ Bruttoenergieverbrauch 2006 gemäss Energiestatistik: 1'166'030 TJ



Figur 1: Potenzial Biomasse 2040 (Stand 2005).



Figur 2: Schweizerischer Endenergieverbrauch 2006.

ANVISIERTE ZIELE 2007

In Übereinstimmung mit dem Konzept der Energieforschung des Bundes [39] wurden 2007 folgende Ziele verfolgt:

- Qualitätssicherung:
 - bessere Kenntnis über organische Schadstoffe in Kompost/Gärgut und über die Nutzenaspekte in Kompost/Gärgut;
 - Auswertung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit Co-Vergärung;
 - Übersicht Sicherheit von Biogasanlagen (Risikoabschätzungen)
 - Etablierung Systemprüfung PelletSolar;
 - Zertifizierung für Festbett-Gleichstrom-Vergasen;
 - Diverse Projekte zur Optimierung, Schadstoffminderung, Normierung und Erforschung von Biomasseverbrennung, insbesondere Holzfeuerungen;
 - Entwicklung neuer Anfeuerungsmethode zur Minderung der Staubemissionen für Stückholzfeuerungen;
 - Initiierung von Grundlagenarbeiten zur Bewertung von Technologien und von Holz als Rohstoff und Energieträger.
- Neue Technologien:
 - Weiterentwicklung hydrothermale Vergasung: Inbetriebnahme einer Laboranlage mit kontinuierlicher Biomassezufuhr, stabile Katalysatoren, Salzabscheidung;
 - Marktbeobachtung der Vergasung;
 - Verbrennungsversuche verschiedener biogene Energieträger abschliessen.
- Ökobilanz von Energieprodukten:
 - Abschluss Teilprojekt 2 (ökologische Bewertung) und Publikation der Resultate.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

VERFAHRENSOPTIMIERUNG

Gemäss Abschätzungen des Bundesamts für Umwelt emittieren Holzheizungen ein Mehrfaches an Feinstaub als sämtliche Öl- und Gasheizungen zusammen, obwohl sie einen geringeren Anteil zur Wärmeerzeugung leisten. Massnahmen zur Verminderung der Feinstaubemissionen aus Holzfeuerungen sind deshalb vordringlich, wobei Unterschiede bezüglich der verschiedenen Brennstoffe und Feuerungstypen zu berücksichtigen sind. 2006 hat der Bundesrat einen Massnahmenplan gegen Feinstaub verabschiedet. 2007 wurden die vorgeschlagenen Änderungen der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) verabschiedet, die auf eine Verringerung des Ausstosses von gesundheitsschädigendem Feinstaub abzielen. Grosse Holzfeuerungen müssen schrittweise mit Filtersystemen ausgerüstet werden. Neue kleinere Holzheizungen müssen den Normen der Europäischen Union entsprechen und die neuen schweizerischen Grenzwerte erfüllen. Zudem wird

der Staubgrenzwert für Industrieanlagen um mehr als die Hälfte gesenkt. Bei Feuerungsanlagen für Holz und anderer Biomasse hat die Reduktion des Staub- und Stickoxidgehaltes deshalb hohe Priorität. Im Folgenden werden die wichtigsten Projekte aufgeführt:

Im Berichtsjahr wurde an der neuen Versuchsanlage im Projekt **Low-Particle Unterschubholzfeuerung** [25] gezeigt, dass ein «Low-Particle-Betrieb» grundsätzlich möglich ist. Aufgrund der kontinuierlichen grössenaufgelösten Staubmessung kann der Zusammenhang zwischen Betriebsparametern und Emissionen direkt erfasst werden. Für eine weitere Optimierung der Anlage bei trockenem Brennstoff wurde eine Abgasrezirkulation eingebaut und die Luftmenge bei kalter Anlage eingereguliert. Die automatische Regelung für einen «Low-Particle-Betrieb» mit Luftmengensensoren und Temperaturregelung des Glutbetts wurde installiert und erfolgreich getestet. Wegen personeller Engpässe konnte noch

kein Dauerbetrieb mit der neuen Steuerung realisiert werden. Der Zeitplan für die Testmessungen musste daher verschoben werden. Es ist geplant, die Messungen im Frühjahr 2008 wieder aufzunehmen.

Mit der Messserie **Regelkonzepte für bivalente Holzheizungsanlagen** [29] wurden verschiedene definierte Standardschaltungen auf ihre Tauglichkeit in einer Feldmessung getestet. Im Erstprojekt *Azmoos* handelte es sich um eine bivalente Holzheizungsanlage mit Speicher. Im vorliegenden Messprojekt *Kaisten* wird eine Anlage ohne Speicher untersucht. Der warme Winter 06/07 und Ausfälle bei der Datenübertragung hatten zur Folge, dass nicht alle Daten auswertbar waren. Trotzdem konnten die zu bevorzugenden und die zu vermeidenden Regelkonzepte für verschiedene Anlagentypen verglichen werden. Allgemeinen Erfahrungen aus diversen Betriebsoptimierungsprojekten erlauben zudem folgende Bemerkungen: Die Wege Planer-Verkäufer-Schemabüro-Servicetechniker sind meist zu lang. Die Betriebsoptimierung erfordert oft zwei Jahre und der Aufwand wird häufig unterschätzt. Ausserdem sollte sichergestellt werden, dass die Einstellungen nicht wieder verstellt werden.

In der ersten Phase des Projektes **Erweiterte Partikelanalytik für Holzfeuerung** [4] ging es darum, das neue Aerosolmassenspektrometer am Paul Scherrer Institut (PSI) zu testen. Dabei wurden unter anderem Smogkammeruntersuchungen durchgeführt. Am Ökozentrum Langenbruck wurden dann im Oktober und November 2007 die ersten Untersuchungen zu Holzfeuerungsemissionen durchgeführt. Dabei wurden ein Pellet- und 3 Stückholzöfen getestet. Die Auswertungen haben erst begonnen und belastbare Resultate sind noch nicht vorhanden. Erste Resultate zu den Smogkammeruntersuchungen, den Gerätetests und zu einem Beispiel der Holzfeuerungsmessungen zeigen jedoch, dass in der Startphase einer Pelletfeuerung signifikante organische Partikelkonzentrationen gemessen werden. Weitere Synergien dieses Projektes werden mit dem kürzlich bewilligten *IMBALANCE (Impact of Biomass burning Aerosol on Air quality and Climate)*-Projekt des ETH-Bereichs und der Fachhochschule Nordwestschweiz/Institut für Aerosol- und Sensortechnik (FHNW/IAST) erwartet. In diesem Projekt ist eine Untersuchung der Alterungsprozesse der Biomasse-Verbrennungsemissionen in der Atmosphäre, insbesondere eine Abschätzung und Charakterisierung der sekundär gebildeten Feinstaubmasse aus gasförmigen Emissionskomponenten der Holzfeuerungen, im Fokus der Untersuchungen.

Die Emissionen an Feinstaub und unverbrannten gasförmigen Schadstoffen von Holzfeuerungen können durch das Anfeuern und die Betriebswei-

se teilweise drastisch beeinflusst werden. Dies gilt insbesondere für handbeschickte Holzfeuerungen, in untergeordnetem Mass aber auch für automatische Feuerungen und Pelletheizungen. Im Projekt **Partikelemissionen von Holzfeuerungen bis 70 kW** [25], das vom Bundesamt für Umwelt mitfinanziert wird, wird der Einfluss der Betriebsweise auf die Feinstaubemissionen untersucht. Nebst der Gesamtmasse an Feinstaub werden auch die kondensierbaren und die flüchtigen organischen Verbindungen erfasst, da diese besonders gesundheitsrelevant sind. Aus der Untersuchung werden Empfehlungen für eine optimale Betriebsweise in der Praxis und Vorschläge zum Vollzug der Emissionsgrenzwerte und der Messungen während der Typenprüfung für erhöhte Anforderungen abgeleitet. Damit soll in Zukunft verhindert werden, dass Holzfeuerungen auf dem Prüfstand ideal betrieben tiefe Emissionswerte ausweisen, bei normalem Praxisbetrieb aber unzulässig hohe Emissionen verursachen. Dies soll auch ermöglichen, dass Feuerungen oder Heizsysteme die im Praxisbetrieb tatsächlich tiefe Werte erzielen bevorzugt werden können. Im Berichtsjahr wurde das Forschungslabor an der Hochschule Luzern für die Untersuchungen aufgebaut und mit der erforderlichen Messtechnik und Datenerfassung ausgerüstet. Im Weiteren wurde mit den Industriepartnern das Versuchsprogramm festgelegt und die Messanordnungen in Anlehnung an die europäischen Normen, jedoch mit teilweise notwendigen Ergänzungen, ausgelegt. Die zu untersuchenden Feuerungsanlagen umfassen zwei moderne Stückholzkessel mit zweistufiger Verbrennung und unterem Abbrand, einen Pelletkessel, einen konventionellen Holzofen mit schamottiertem Feuerraum und einen Holzofen mit Zündholzabbrand. Als Vergleich für einfache Feuerungssysteme werden zudem ein aus dem Verkehr genommener alter Stückholzkessel sowie ein einfacher metallischer Holzofen untersucht.

Im ersten Schritt des Forschungsvorhabens **Brennkammer für Holzfeuerstätten mit geringen Partikelemissionen** [33] wurden auf dem Markt erhältliche Feuerungen auf die Partikelemissionen in den Betriebsphasen Anfeuern, Brennstoffnachlegen und Teillast untersucht. In Ergänzung zu den gravimetrischen Staubmessungen analysierten das Labor für Atmosphärenchemie am Paul Scherrer Institut und die Fachhochschule Nordwestschweiz mit Projekt [4] online die Grössenverteilung und die chemische Zusammensetzung der Partikel. Diese erweiterte Partikelanalytik bietet die einmalige Chance, die bezüglich Lufthygiene relevanten Innovationen in der geplanten Weiterentwicklung der Brennkammern angehen zu können. Erste Auswertungen zeigen, dass die nach dem Stand der Technik gebauten Brennkammern sowohl im Anfeuern

wie im Nennlastbetrieb Verbesserungspotenzial haben. Die im Verdünnungstunnel gemessenen Staub-Emissionsfaktoren bei Nennlast der Cheminéefeuerungen überschreiten den Zielwert des Projektes in einem Mass von 60% bis 180%. Der Speicherofen unterschreitet den Wert um 20%.

Das von der KTI mitunterstützte Eureka-Projekt **Biopoly-Heat** [33] hatte zum Ziel, Lösungen zur emissionsarmen Verbrennung von trockenen, nicht holzigen (pelletierbaren) Brennstoffen zu entwickeln. Das Schweizer Konsortium fokussierte die Entwicklung auf einen möglichst produkt-nahen Prototyp eines automatischen Heizkessels für pelletierte Brennstoffe im Leistungsbereich zwischen 50 und 100 kW. Dabei wurde parallel die Prüfung und Weiterentwicklung eines serien-nahen Prototypen *Biolylt 70* vorangetrieben und ein Funktionsmuster *Bioflox IDDEA*® entwickelt, aufgebaut und mit verschiedenen Brennstoffen getestet. *Bioflox IDDEA* (*IDDEA = Integrated Dust and Dioxine Avoidance*) stellt ein nun geprüf-tes Konzept dar, wie sowohl Stickoxid- (NO_x), Staub- und Dioxin-Emissionen wirkungsvoll vermindert werden können. Das Resultat des Projektes umfasst auf der einen Seite ein im Dauereinsatz erprobtes Produkt, sowie Erfahrungen mit dem Funktionsmuster *Bioflox-IDDEA*, das auch mit Chinaschilf-Pellets sehr gute Emissionswerte aufweist. Die Dioxin-Verhinderungsstrategie soll im Anschluss an den Projektabschluss noch verifiziert werden.

Bei der **Thermische Nutzung anspruchsvoller Biomassebrennstoffe** [26] wurden im November und Dezember 2006 Versuche mit den Brennstoffsor-timenten «Riedstreu + Hackschnitzel» und «Pferdemist + Hackschnitzel + Riedstreu» durch-geführt. Die Versuche zeigen, dass unter optima-len Bedingungen die beiden Brennstoffsor-timente mit tiefen Emissionen und ohne wesentliche Schlackenbildung energetisch genutzt werden können. Im Berichtsjahr wurden noch Auswer-tungen gemacht und das Projekt abgeschlossen.

Ziel des im Oktober 2007 begonnenen Nachfolge-projektes **PelletSolar-2** [28] ist die energetische Optimierung von Systemen, welche Pelletkessel mit Solaranlagen kombinieren. Das vorausgegan-gene Projekt *PelletSolar-1* konnte am Beispiel eines ausgewählten Pellet-Solar-Systems das Potential zur energetischen und der damit ein-hergehenden emissionstechnischen Optimierung von Pelletsystemen aufzeigen. 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 Be-triebsführung stark reduzieren. Unter der Einbe-rechnung der elektrischen Hilfsenergie ging dies einher mit einem verbesserten Nutzungsgrad und

reduzierten Emissionswerten. Im Rahmen des Folgeprojektes soll die Allgemeingültigkeit dieser Resultate anhand von zwei weiteren Systemen geprüft werden. Dazu werden wiederum einzelne Komponenten (Kessel, Pufferspeicher) sowie das System als Gesamtes im dynamischen System-prüfstand ausgemessen. Ein weiterer zentraler Bestandteil des Folgeprojektes ist es, die Voraus-setzungen für eine standardmässige Prüfung von Pelletsystemen zu schaffen. Diese Prüfung hat den Fokus auf der Systemebene und grenzt sich klar von der klassischen Kesselnormprüfung ab. Die seit Projektstart erfolgten Arbeiten umfassen eine ergänzende Systemmessung zu *PelletSolar-1*, eine Recherche zum Stand des Wissens bzgl. Feinstaubemissionsfaktoren sowie die hard- und softwaremässige Vorbereitung des Systemprüf-standes für die anstehenden Messungen. Hin-sichtlich der Verbreitung der Resultate wurde das Projekt für einen Konferenzvortrag an der OTTI-Solarthermie-Konferenz 2008 und die BioEnergy-World-Konferenz 2008 in Schweden eingereicht. Der OTTI-Vortrag wurde zwischenzeitlich bereits angenommen.

Im Projekt **Evaluation von Messverfahren zur Messung der Wirksamkeit von Partikelab-scheidern bei kleinen Holzfeuerungen** [30] sol-len einerseits Resultate über die Effizienz eines elektrostatischen Partikelabscheiders (ESP) auf-gezeigt und andererseits ein Vorschlag ausge-arbeitet werden, wie in Zukunft Prüfungen von Partikelabscheidern bei Holzfeuerungen kleinerer Leistung an Prüfstellen möglichst einfach und zuverlässig durchgeführt werden können. Die Projektführung und Hauptfinanzierung liegt beim BAFU. Im Rahmen des Projektes wurde an der Prüf-stelle für Holzfeuerungen der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) eine Messstrecke für ESP aufgebaut sowie die erforderliche Mes-sinfrastruktur erweitert. Anschliessend wurden mit mehreren unabhängigen Messmethoden Un-tersuchungen zur Abscheideeffizienz eines ESP durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass die durch eine gravimetrische Gesamtmassenmessung bestimmte Effizienz (56%) deutlich tiefer ist, als die Messung der Anzahlkonzentration der Partikel unter $10\ \mu\text{m}$ (>70%). Im nächsten Projektteil soll diesem Unterschied nachgegangen werden, in-dem auch die Gesamtstaubmessung auf Partikel kleiner als $10\ \mu\text{m}$ beschränkt wird.

FOLGENDE PROJEKTE IM BEREICH VERFAHRENSOPTIMIERUNG BETREFFEN DIE ÜBRIGE BIOMASSE (OHNE HOLZ):

Développement d'un concept combiné de production de biogaz et d'élimination de l'ammoniac appliqué aux effluents agricoles [13]: Le traitement biologique de l'ammoniac par le procédé classique de nitrification/dénitrification se heurte à deux problèmes majeurs : le coût et la

complexité. Ce projet a développé un concept intégré de production de biogaz et d'élimination biologique de l'ammoniac contenu dans le lisier en tirant parti des nouvelles recherches dans ce domaine afin de limiter les besoins d'aération, la consommation d'une source externe de carbone et de simplifier l'exploitation. Une étude expérimentale, menée sur l'effluent de l'installation de biogaz de la famille Martin à Puidoux, a été réalisée au Laboratoire de Biotechnologie Environnementale de l'École polytechnique fédérale de Lausanne et a montré que: 1) Le processus de nitrification est obtenu avec cet effluent dans un réacteur aérobie; 2) Le processus de dénitrification est aussi obtenu dans le réacteur aérobie en utilisant un support mobile fixant la biomasse. Les rendements obtenus sont très élevés : 90% de l'ammonium est transformé et 80% est éliminé sous forme de N_2 ; 3) Le processus ANAMMOX (*Anaerobic Ammonia Oxidation*) peut également être obtenu, mais est instable et n'est donc pas recommandé. L'énorme avantage de la nouvelle méthode est que l'ensemble des réactions se déroulent dans un seul réacteur, sans modifier le fonctionnement du digesteur. Le bilan d'azote montre que, si la totalité de l'effluent est traité dans le réacteur aérobie, l'élimination de l'azote total initial dans la configuration retenue est de 50%. Au niveau du bilan énergétique, le concept n'a pas d'incidence sur la production de biogaz.

Strömungstechnische Optimierung eines Biomasse-Rührwerks [14]: Ziel des Projektes war die strömungstechnische Optimierung eines Biomasse-Rührwerks. Um einen hohen Anlagenwirkungsgrad zu erzielen, sollte die Antriebsleistung möglichst gering sein. Zudem werden hohe Anforderungen an die Festigkeit und den Korrosionsschutz einer Anlage gestellt. Anhand von Simulationen wurde ein neues Flügelprofil entwickelt, das im Vergleich zum Originalflügel eine homogenere Abströmung aufweist. Durch die optimierte Umströmung der Propeller ist das Verhältnis von Schub- zu Antriebsleistung stark gestiegen. Die Simulationen des ganzen Beckens zeigen, dass der Wirkungsgrad des Rührwerks mehr als verdoppelt werden kann. Das bedeutet, dass die gleiche Mischwirkung mit der Hälfte des Aufwandes möglich ist. Die Struktur der Propeller ist mit *Finite Elements Method* (FEM)-Berechnungen qualitativ überprüft worden. Erste Feldversuche bestätigen den Erfolg dieser Untersuchung.

Monovergärung von Glycerin [15]: Im Rahmen dieses Projekts wird untersucht, wie eine Vergärungsanlage konzipiert und betrieben werden muss, um ein spezifisches Substrat in dominierender Menge vergären zu können (Monovergärung). Die mit der Monovergärung zu erwartenden Probleme wie Hemmungen und Limitationen sowie Pump- und Mischprobleme werden untersucht und entsprechende Lösungen aufgezeigt.

Durch die Versuche im Jahr 2007 wurden folgende Resultate gewonnen: Der maximale Biogasertrag von Rohglycerin aus der RME (*Rapeseed Methyl Ester*)-Produktion beträgt im kontinuierlichen Praxisbetrieb (anaerobe Vergärung) 1100 L/L Glycerin, bzw. 870 L/kg Glycerin. Der mittlere Methan-gehalt im Biogas liegt bei 70%. Die Adaptionsgeschwindigkeit der Biologie an das Substrat Glycerin ist hoch. Zwei bis drei Tage nach dem Start der Glycerinzugabe werden bereits 100%-ige Abbauraten erreicht. Bei einer adaptierten Biologie wird die Biogasproduktion durch Änderungen der Beschickungsmenge in weniger als einem Tag entsprechend beeinflusst. Aufgrund der bisherigen Versuche kann festgehalten werden, dass eine gut adaptierte Biologie innerhalb von 5 Stunden auf eine Steigerung der Beschickung mit Zunahme der Gasproduktion reagiert.

Klein-Biogasanlagen in der Landwirtschaft [16]: Es wurde die Realisierbarkeit von landwirtschaftlichen Kleinbiogasanlagen in der Schweiz untersucht. Im Rahmen dieser Studie wurde eine standardisierte Kleinbiogasanlage entworfen, welche den heutigen Ansprüchen genügt. Diverse bestehende Anlagen, welche hauptsächlich in den 1970er- und 1980er-Jahren gebaut wurden, sind technisch analysiert worden. Eine Wirtschaftlichkeitsberechnung der entworfenen Kleinbiogasanlage wurde durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die Rahmenbedingungen für Kleinbiogasanlagen nach wie vor sehr schlecht sind. Nur eine deutliche Erhöhung der Stromeinspeisegebühren könnte einen rentablen Betrieb der Anlagen ermöglichen. Gaseinspeisung ins Erdgasnetz und ausschliessliche Wärmeproduktion sind heute bei Kleinanlagen wirtschaftlich kaum realisierbar. Eine Befragung hat gezeigt, dass nur sehr wenige ehemalige Betreiber von stillgelegten Kleinbiogasanlagen eine Wiederinbetriebnahme ihrer Anlage für technisch möglich halten und Interesse daran haben. Viel eher sind sie am Bau einer neuen Biogasanlage interessiert. Kaum ein Betreiber von einer Anlage, welche heute noch in Betrieb ist, möchte sie in näherer Zukunft stilllegen. Diverse Betreiber erwägen jedoch den Ausbau ihrer bestehenden Kleinbiogasanlage.

Sicherheit von landwirtschaftlichen Biogasanlagen [17]: Die Zahl und die Grösse der Biogasanlagen in der Schweiz nehmen in den letzten Jahren kontinuierlich zu. Damit gewinnt auch der Aspekt der Sicherheit der Anlagen für den Betreiber, die Bevölkerung und die Umwelt an Bedeutung. Neben den Konsequenzen für die unmittelbar Betroffenen durch Unfälle, sind Ereignisse auch aus Sicht der Förderung der Energie aus Biomasse zu sehen. Grosse Unfälle können die Förderung und Verbreitung einer Technologie erheblich bremsen, indem sie Verunsicherung bei Betreibern der Anlagen und der Gesellschaft hervorrufen und zu möglicherweise ungerechtfertigt

hohen Auflagen für den Bau und Betrieb führen. Es ist daher wichtig, vorbeugend und umfassend die Sicherheitsfrage anzugehen. Abklärungen zur Sicherheit von landwirtschaftlichen Biogasanlagen liegen für verschiedene Teilbereiche und einzelnen Fragestellungen vor (schweizerische und internationale Arbeiten). Es fehlt aber ein Überblick, der das Thema aus Risikosicht beleuchtet und die schweizerischen Besonderheiten (Betriebsart und -grösse) berücksichtigt. Im Rahmen dieses Projekts wurde in einem ersten Schritt eine Auslegeordnung geschaffen, die den Kenntnisstand zum Thema wiedergibt und eine Grobbeurteilung mit Hinweisen zu Schwachstellen oder Kenntnislücken enthält. Die Gefahrenbeurteilung wurde anlässlich eines Workshops mit Fachleuten aus der Praxis verifiziert.

Emissionsarme Verbrennung und energetische Nutzung von Schwachgasen bis unter 2.5 MJ/m³ [18]: Mit Laborversuchen wurde am Ökozentrum Langenbruck nachgewiesen, dass Schwachgase von 6.5% Methan-Gehalt (Rest typische Abgaszusammensetzung ohne O₂) autotherm verbrennbar sind. Mit weiteren systematischen Versuchen soll nachgewiesen werden, dass ein Gemisch aus 5% Methan und 95% CO₂ (ca. 3.8% CH₄ in typischem Abgas-Gemisch) ebenfalls stabil und ohne Methan-Schlupf verbrennbar ist. Parallel dazu soll mit anderen Mitteln ein Bivalent-Kessel entwickelt werden, welcher die erwähnten Gase, die als Abgase bei der Methanisierung von Biogas im PSA (*Pressure Swing Adsorption*)-Verfahren entstehen, zur Heizung von Fermentern eingesetzt werden können. Die Spitzenkesselfunktion soll mit Biogas ergänzt werden. Methanschlupf bei der Biogasaufbereitung ist in besonderem Masse klimarelevant und belastet entsprechend die Ökobilanz. Mit dem vorliegenden Projekt sollen Verwertungsmöglichkeiten solcher Schwachgase weiter entwickelt werden.

Entwicklung einer Biogasanlage in Holzbauweise [19]: Die Studie *Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas* [41] hat gezeigt, dass bei Einsatz des Baumaterials Holz für den Behälter aus Sicht der Umwelt ein Fünftel der gesamten Umweltbelastung, die durch die Bereitstellung der Infrastruktur erzeugt wird, eingespart werden kann, bzw. dass rund 40 mal weniger Umweltbelastung für den Behälterbau entsteht als bei der Bauweise in Beton oder Stahl. Das Baumaterial Holz hat zudem weitere Vorteile wie beispielsweise Korrosionsbeständigkeit, einfache Bearbeitung, Dichtigkeit etc. Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden technische Konstruktionsdetails, die Auswahl verfahrenstechnischer Komponenten sowie die Kosten für schlüsselfertige Anlagen ermittelt.

ANALYSE UND OPTIMIERUNG DER STOFFFLÜSSE

MBR-Messkampagne [12]: Ziel des Projektes war die Abklärung der Eignung des Membranreaktors (MBR) zur Vergärung sowohl von Gülle als auch von Gülle und Co-Substraten. Anhand von Laboruntersuchungen und von einer Versuchsanlage wurden die Erkenntnisse erarbeitet, die für den Betrieb einer P&D-Anlage nötig waren. Während der Messperiode von Ende November 2006 bis Ende November 2007 wurden rund 14'100 t Biomasse verarbeitet. Davon liegt der Gülleanteil bei rund 8'000 Tonnen. Die verarbeitete Menge entspricht rund 50-60% der maximalen Verarbeitungskapazität. Dies begründet sich mit einer vorsichtigen Beschickung in der Anfahrphase und einer zurückhaltenden Annahme von Abfällen als Folge der anfänglich unzureichenden Fest-Flüssigtrennung sowie der unbefriedigenden Abluftreinigung für den Sektor der Sterilisationsanlage. Aufgrund dieser Schwierigkeiten und der entsprechend vorgenommenen Umbauarbeiten konnte während der gesamten Messkampagne kein genügend langer Zeitraum betrachtet werden, um das MBR-Verfahren ausreichend zu prüfen. Die drei Fermenter lieferten während der Messperiode rund 1.56 Mio. m³ Biogas mit einem durchschnittlichen Methangehalt von 63%. Die Gasausbeute liegt bei 110 m³/t Frischsubstanz (FS) bzw. bei 230 m³/t FS bei den Co-Substraten. Das installierte Blockheizkraftwerk (BHKW) mit einer Leistung von 1.1 MW_{el} lieferte während des Messjahres 3'870 MWh Strom. Der Eigenverbrauch der Anlage inklusive Lager- und Bürotrakt lag bei rund 1'049 MWh elektrisch. Die Abwärme des BHKW wird für die Sterilisationsanlage, Futterküche und Gebäudeheizung genutzt. Hierdurch konnten seit Inbetriebnahme rund 160'000 kg Heizöl eingespart werden.

Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz [20]: In der Schweiz werden jährlich rund 600'000 t biogene Abfälle zu hochwertigem Kompost verarbeitet und so in den Stoffkreislauf zurückgeführt. Die Kompostierung ist damit von grosser ökologischer und volkswirtschaftlicher Bedeutung. Mit den Ausgangsmaterialien können auch unerwünschte Substanzen (organische Schadstoffe und Schwermetalle) in den Kompost gelangen. Im Rahmen dieses Gemeinschaftsprojekts mit dem BAFU wurde eine solide Datenbasis als Grundlage für Qualitätssicherung und Risikomanagement erarbeitet. Der Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung wird massgeblich mit potenziellen, nicht genügend bekannten Auswirkungen des Eintrags von organischen Schadstoffen durch Klärschlammdüngung in die Böden begründet. Eine ähnliche Entwicklung muss bei Kompost und Gärgut wegen deren grossen ökologischen und volkswirtschaftlichen Bedeutung unbedingt ver-

mieden werden. Die Ergebnisse werden anlässlich eines wissenschaftlichen Kongresses Anfang 2008 der Öffentlichkeit vorgestellt.

Auswirkungen von Komposten und Gärgut auf die Umwelt, Bodenfruchtbarkeit und Pflanzengesundheit [21]: In der Schweiz werden zurzeit rund 600'000 t TS (Trockensubstanz) biogener Abfälle rezykliert. Längerfristig werden jedoch nur die Komposte und das Gärgut abgesetzt werden können, die eine Wertsteigerung der Böden bewirken. Ziel des vorliegenden Projektes ist es, die Qualitätsparameter gezielt in diese Richtung zu erweitern und die Auswirkungen von Kompost- und Gärgutapplikationen auf Pflanzenwachstum und -gesundheit, die Bodenparameter und die Umwelt zu evaluieren. Das vorliegende Projekt ist mit dem Projekt *Organische Schadstoffe in Komposten* der École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) bzw. des Wasserforschungsinstituts des ETH-Bereichs (EAWAG) und der Forschungsantalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART koordiniert. Auch diese Ergebnisse werden anlässlich des oben erwähnten wissenschaftlichen Kongresses Anfang 2008 der Öffentlichkeit vorgestellt.

Methanverluste bei der Biogasaufbereitung [22]: Die mit der Biogasaufbereitung verbundenen potenziellen und tatsächlichen Methanverluste werden im Rahmen des Projekts anhand von Literaturrecherchen, vor allem aber auch durch konkrete Emissionsmessungen an Schweizer Biogas-Aufbereitungsanlagen untersucht. Die Projektgruppe, die sich aus Experten aus Forschung, Messtechnik, Gasvertrieb und Energieverwendung zusammensetzt, wählte die ARA Luzern (GALU), welche eine moderne Biogasaufbereitung nach dem Prinzip der Druckwechseladsorption betreibt, als geeignete Referenzanlage für die erste Messkampagne aus. Aus der Voruntersuchung wurden eine Reihe von Problemen und Ungenauigkeiten bei der Messung der relevanten Stoffströme offenbar. Die Problemfelder wurden analysiert und die erarbeiteten Lösungen in Zusammenarbeit mit den Anlagenbetreibern im Laufe des Jahres umgesetzt. Die eigentlichen Messungen erfolgten im Dezember 2007 an der Anlage in Luzern. Weitere Messungen an anderen Anlagentypen, insbesondere an dem in der Schweiz verbreiteten Waschverfahren auf Glykolbasis, sind erwünscht. Aus den Auswertungen der resultierenden Methanschlußwerte werden Massnahmen zur Emissionsverminderung und -Vermeidung sowie Empfehlungen für ein zukünftiges Vorgehen bei der Aufbereitung von Biogas in der Schweiz abgeleitet.

Massen- und Energieflussanalyse biogener Güter in der Schweiz (Update 2007) [23]: Die Fachgruppe Umweltbiotechnologie der damaligen HSW Hochschule Wädenswil erstellte 2001 im Auf-

trag des BFE eine umfassende Massen- und Energieflussanalyse biogener Güter für die Schweiz (BFE Projekt 39573). Diese Studie basierte auf der aktuellen Datengrundlage 1998/1999. Während der laufenden Dekade haben sich die Mengen und Qualitäten biogener Güter laufend verändert. So ist z.B. die energetische Nutzung im Hinblick auf die notwendige Substitution fossiler Brenn- und Treibstoffe in den Vordergrund getreten. Mehrere Studien zum Potential unterschiedlicher Bewirtschaftungs- und Verwertungsoptionen einzelner Biomassesortimente sind in Bearbeitung, in Vorbereitung oder bereits abgeschlossen. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen zum Verkehr und zum Einsatz einzelner biogener Güter sind im Umbruch. Vor diesem Hintergrund hat sich das BAFU in Zusammenarbeit mit dem BFE und dem BLW entschlossen, die damalige Studie des BFE auf den aktuellen Stand zu bringen und um neue Aspekte zu erweitern.

Oberflächen-Ionisationsdetektor zur Online-Messung von Alkalien in Prozessgasen (MOPSID: Monitoring of Process Gases with a Surface Ionization Detector) [24]: Bei der Umwandlung von Biomasse zu Strom oder Syngas können die in Spuren vorhandenen Alkalien Anlagenteile (Turbinen, Katalysatoren, Wärmetauscher, Brennstoffzellen) schädigen oder Prozessschritte verunmöglichen. Der Alkali-Detektor funktioniert nach dem Oberflächen-Ionisationsprinzip. Mit ihm können die Spuren von Alkalien (K, Na) in Prozessgasen online messbar und kritische Konzentration überwachbar gemacht werden. In einer Dissertation soll der am PSI entwickelte Alkali-Detektor weiterentwickelt, für zeitaufgelöste Messungen 'im Feld' vorbereitet und in Messkampagnen an Biomasse-Vergasern eingesetzt werden. Der Alkali-Detektor ist auch in anderen Biogas erzeugenden Anlagen einsetzbar. Die Arbeiten sollen im Verbund mit einem CCEM (*Competence Center for Energy and Mobility*)-Projekt (WOOD-GAS-SOFC) und swisselectric research (TREP-GAS) erfolgen. Die Entwicklung von verlässlichen Online-Messmethoden für problematische Spurengase ist eine wichtige Basis für die Optimierung von Prozessen zur energetischen Nutzung von Biomasse.

NEUE UMWANDLUNGSTECHNOLOGIEN

Im Projekt **Biogenes Methan durch hydrothermale Vergasung** [10] wird ein hydrothermales Vergasungsverfahren für nasse Biomassesortimente entwickelt, mit dem Ziel, die Biomasse vollständig zu Methan und CO₂ zu vergasen und Nährsalze zurück zu gewinnen. Während Holz bereits durch konventionelle thermische Verfahren energetisch genutzt wird (vorwiegend durch Verbrennung), stellen insbesondere Hofdünger, Gülle, und Klärschlamm ein nahezu ungenutztes Energiepotential dar (Schweizer Güllennutzung 2003: 0.4%).

Hier jedoch liefern aufgrund des hohen Wassergehalts konventionelle Gasphasenverfahren einen zu tiefen Wirkungsgrad (Feuchtigkeit wird energetisch aufwändig verdampft). Als Alternative bietet sich die hydrothermale Vergasung an: Der Wassergehalt der Biomasse dient als Reaktionsmedium, welches unter hohem Druck um 30 MPa und erhöhter Temperatur als überkritisches Fluid vorliegt und apolare Eigenschaften besitzt. Teer-Vorläufersubstanzen, die bei der konventionellen Vergasung zu Problemen führen, können so gelöst und vergast werden. Aufgrund der fehlenden Verdampfungswärme oberhalb des kritischen Druckes (22.1 MPa) sind hohe thermische Wirkungsgrade möglich (65-70%). Die in der Biomasse enthaltenen Nährsalze (Gülle: ca. 20 Massenprozent – Ma.-% – der Trockenmasse, TM) können aufgrund ihrer stark reduzierten Löslichkeit in überkritischem Wasser abgeschieden und für Düngezwecke weiterverwendet werden. Mit der energetischen Nutzung geht also eine stoffliche einher.

Ziel des Projekts am PSI war es, ein katalytisches Verfahren zu entwickeln, das die Vergasung nasser Biomasse zu synthetischem Naturgas (SNG) in einer kontinuierlichen Anlage im Labormassstab demonstriert (Biomassedurchsatz 1 kg/h, liefert bei 40 Ma.-% TM ca. 400 L_{SNG}/h, was einer thermischen Brennleistung von 2 kW_{th} entspricht). Verschiedene Katalysatoren wurden ausgewählt (kommerzielle und selbst synthetisierte) und auf ihre Stabilität im hydrothermalen Medium und auf ihre Salzverträglichkeit (am Beispiel Sulfat) getestet und charakterisiert. Skelettartige Nickelkatalysatoren sowie Ru/Kokosnuss-Aktivkohle (Ru/C) wiesen eine hohe Aktivität und Selektivität bei der Vergasung von Holz auf, wobei die maximal mögliche Methanausbeute von 0.33 g_{CH₄}/g_{Holz} erreicht wurde. Als hydrothermal langzeitstabil erwies sich jedoch nur Ru/C. Hierbei wurde eine konstante Produktgaszusammensetzung im Gleichgewicht über eine Versuchsdauer von 220 h bei hohen Katalysatorbelastungen erreicht. Die Salzverträglichkeit dieses Katalysators ist jedoch sehr gering, was auf eine chemische Vergiftung des katalytisch aktiven Metalls zurückzuführen war. Daher müssen die in der Biomasse vorhandenen Salze vor dem katalytischen Reaktor abgetrennt werden. In der aufgebauten Prozessdemonstrationsanlage wurden Versuche zur kontinuierlichen Salzabscheidung durchgeführt, wobei sich herausstellte, dass die kontinuierliche Abscheidung möglich ist, jedoch stark vom Phasenverhalten des Salzes abhängt. Ein Vergasungsversuch mit einem Palmöl-Pyrolysekondensat wurde in der Prozessdemonstrationsanlage durchgeführt. Dieser Versuch musste aufgrund der Verstopfung des Salzabscheiders mit Koks abgebrochen werden. Der gebildete Koks konnte durch Nassoxidation mit Wasserstoffperoxid entfernt werden. Mass-

nahmen, um diese Koksbildung zu unterdrücken, wurden erarbeitet.

Bisherige Untersuchungen im Rahmen des Projektes **Methan aus Holz** [3] haben gezeigt, dass die Lebensdauer des Methanierungskatalysators stark vom Schwefelgehalt abhängt. Im neu gestarteten Projekt sollen Grundlagen für das Design und die Optimierung der Hochtemperatur-Entschwefelung erarbeitet werden. Im ersten Schritt sollen im Labor die Anforderungen der Katalysatoren an die Reingasqualität besser verstanden werden. Auf den erarbeiteten Grundlagen können dann die Hochtemperatur-Entschwefelungsverfahren für den «Methan aus Holz»-Prozess angepasst und geprüft werden.

Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes im unteren Leistungsbereich mit eigener Ölmühle [11]: Der Einsatz von unverändertem Pflanzenöltreibstoff im Fahrzeug- und Stationärmotor erfährt als nachwachsende Energiequelle und Produktionsnische für die Landwirtschaft zunehmende Bedeutung. Die wenigen, bisher verfügbaren pflanzenölauglichen Motorumrüstungen erfüllen indessen die aktuellen Abgasvorschriften nicht. Für Pflanzenöl-Blockheizkraftwerke (BHKWs) im Leistungsbereich von 50 bis 500 kW besteht zudem eine Angebotslücke. Ein breit abgestütztes Konsortium will deshalb ein mit Rapsöl betriebenes BHKW mit eigener Ölversorgung entwickeln, welches die Schweizer Abgasnormen erfüllt. Bis Ende Mai 2007 wurden mit der Ölmühle aus 300 Tonnen Rapssaat rund 100'000 Liter Rapsölkraftstoff produziert. Nach den Umbauten im Sommer 2007 konnten weitere 50'000 Liter Rapsölkraftstoff für die von *grenetec* umgerüsteten Häcksler und Traktoren der Lohnunternehmen *Stähli*, *Suberg* und *Gautschi*, Herbstwil bereitgestellt werden. Der Rapskuchen konnte nebst dem Direktverkauf an Landwirte als gefragtes Nebenprodukt für die Produktion organischer Spezialdünger der benachbarten Firma *Huert HBG Dünger AG* geliefert werden. Bei der Kraftstoffgewinnung mit Kaltpressung darf der technisch erreichbare Abpressgrad wegen den limitierten Gehalten an Phosphor und Erdalkalien nicht ausgenutzt werden. Dieses Problem wurde im Rahmen einer Diplomarbeit im Sommer 2007 angegangen. Dabei gelang es, mit einem Additiv auf Silikatbasis Phosphor, Magnesium und Kalzium auf unter 1 bis 2 ppm abzusenken. Wenn diese Werte im Dauerbetrieb bestätigt werden können, ist dies ein enormer Schritt vorwärts. Das BHKW wurde mit Motor, Generator und allen Flüssigkeitstanks bei unserem deutschen Projektpartner in Heitersheim und Grafenhausen vorgebaut und am 07.12.07 nach Suberg überführt. Anfang 2008 wird mit seiner Komplettierung mit *Denox/Diesel Particulate Filter* (DPF)-Anlage und Not-Kühlagregat begonnen.

Aufbereitungs- und Betankungsanlage für kleinere Biogasproduktionsmengen [34]: Biogas besteht zu etwa gleichen Teilen aus Methan und CO₂ und ist mit Wasser gesättigt. Drei Methoden wurden für die Aufbereitung von kleineren Biogasproduktionsmengen untersucht: Kryogene Gastrennung, Membrantrennung und Druckwechseladsorption. Der Vergleich der Verfahrenseigenschaften zeigt, dass sich grundsätzlich alle drei Verfahren eignen. Sie sind in unterschiedlichen Entwicklungsstadien, um bei Kleinanlagen eingesetzt zu werden. Die Analyse hat weiter gezeigt, dass Prinzipversuche unerlässlich sind, um die Machbarkeit und die wirtschaftlichen Grenzen zu ermitteln. Der grobe Wirtschaftlichkeitsvergleich mit konventioneller Verstromung von Biogas hat das Potential der Biogasaufbereitung zu Treibstoff weiter erhärtet. In der Phase II soll ein Funktionsmuster für die experimentelle Verfahrensforschung an der Fachhochschule Burgdorf aufgebaut werden. Im Berichtsjahr konnte der Bau eines Funktionsmusters angegangen werden. Aufgrund der hohen Auslastung der *apex AG* hat aber das Projekt Verzögerungen erfahren.

GRUNDLAGEN, STUDIEN, KONZEPTE

Im Rahmen von verschiedenen Studien wurden bisher Energieprodukte hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen untersucht. Dabei wurden nicht erneuerbare (fossile) Energieträger untereinander, aber auch mit erneuerbaren verglichen. Die Untersuchungen aus der Schweiz beschränkten sich jedoch meist auf einzelne Umweltbereiche oder beleuchten nur einzelne Aspekte der Umweltauswirkungen. Zudem sind bei biogenen Energieträgern die Anbaumethoden und -varianten nicht systematisch untersucht worden. Um einerseits im Forschungsprogramm Biomasse die richtigen Schwerpunkte setzen zu können und andererseits in der politischen Diskussion im Bereich Energie-, Umwelt- und Klimapolitik über die entsprechenden Entscheidungsgrundlagen zu verfügen, braucht es umfassende Ökoinventare von Energieprodukten, die alle relevanten Umweltbereiche gleichermaßen berücksichtigen und sowohl biogene als auch fossile Energieträger umfassen. Die erarbeiteten Ökoinventare sind modular (Prozesse bzw. Prozessketten) aufgebaut, sodass eine Erweiterung und eine Bilanzierung von weiteren Anwendungsfällen einfach möglich ist. Alle Sachbilanzdaten wurden in den Datenbestand der *ecoinvent* Datenbank v2.0 integriert. Für die Erweiterung hinsichtlich neuer Produkte und Verfahren wurden im Projekt klare Richtlinien erarbeitet. Die Ökoinventare bilden die Basis für eine **Ökobilanzierung** [1] verschiedener Produkte und Herstellungswege. Die Daten wurden in einem Teilprojekt durch die EMPA bewertet. Dabei zeigte sich, dass Biotreibstoffe nicht zwingend umweltfreundlicher sind als fossile Treibstoffe. Bei den meisten Biotreibstoffen

zeigt sich ein Zielkonflikt zwischen der Minimierung der Treibhausgasemissionen und einer positiven ökologischen Gesamtbilanz.

RENEW – Life Cycle Assessment for BTL-fuel production [2]: Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes RENEW (*Renewable Fuels for Advanced Powertrains*) werden Verfahren für die Herstellung von Treibstoffen aus Biomasse mittels Vergasung und anschließender Fischer-Tropsch Synthese entwickelt. Die verschiedenen Umwandlungsverfahren werden mit einer Ökobilanz nach ISO 14040 ff verglichen. Dabei wird der Lebenszyklus von der Biomasse Produktion bis zur Bereitstellung des Kraftstoffs untersucht. Im Berichtsjahr wurde das Projekt abgeschlossen.

Strategie zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz [5]: Die Bundesverfassung verpflichtet den Bund zur Förderung der nachhaltigen Entwicklung. Für den Energiebereich heisst dies konkret: mehr Energieeffizienz und Ausbau der erneuerbaren Energien. Zurzeit stammen 83.8% des schweizerischen Endenergieverbrauchs aus nicht erneuerbaren Quellen. Gemäss Biomasse-Potenzialstudie könnten gut 10% des heutigen Primärenergieverbrauchs ökologisch vertretbar mit Biomasse gedeckt werden. Damit könnte die Biomasse einen wichtigen Beitrag sowohl zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele der Schweiz als auch zur Reduktion der Abhängigkeit von nicht erneuerbaren Energien sowie zur Verbesserung der Versorgungssicherheit leisten. Es soll eine Strategie zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz erarbeitet werden, die aufzeigt, wie das vorhandene Biomasse-Potenzial möglichst vollständig, effizient und umweltschonend genutzt werden kann. Im Vordergrund stehen technische, ökologische und energiepolitische Aspekte. Es sollen aber auch sozio-ökonomische Fragen behandelt werden. Bei der Beurteilung der Biomassensortimente, der Umwandlungstechnologien und der Energieprodukte sollen insbesondere die Ressourcenökonomie (sparsamer und effizienter Einsatz der Biomasse, geschlossene Stoffkreisläufe), die Umweltauswirkungen (Ökobilanz) und die Wertigkeit der Energie (Exergie) berücksichtigt werden. In einem ersten Schritt wurde eine Auslegeordnung als internes Grundlagenpapier erstellt.

Ziel des Projektes **Feuchtegehalt-Änderung des Waldfrischholzes bei Lagerung im Wald** [35] ist die Ermittlung der optimalen Lagerdauer und Lagermethodik für frisch geschlagenes Holz im Wald und deren wirtschaftliche Folgen für die Pelletierung. Dabei darf die Lagerung nicht zu lange andauern, da ansonsten der Feuchtegehalt nach einem anfänglichen Absinken wieder ansteigt und das Holz zudem an Brennwert infolge mikrobiologischem Abbaus verliert. Bei einer optimalen

Lagerung werden der Trocknungsaufwand und damit der Fremdenergiebedarf verringert. Zudem sinken aufgrund des reduzierten Gewichtes die Transportkosten. Oft hat trockeneres Holz auch einen positiven Einfluss auf Lebensdauer und Wartungskosten von Feuerung und Kessel sowie auf die Rauchgase. Die Resultate des Projektes sollen als Grundlage für die Entwicklung der Logistikette vom Wald zum Pelletswerk dienen. Zudem können die Resultate auch für die Herstellung von Hackschnitzeln mit reduziertem Feuchtegehalt und somit erhöhtem Brennwert verwendet werden.

Feststoffvergärung in der Schweiz [6]: In der Schweiz werden zurzeit vermehrt Biogasanlagen realisiert. Die realisierten Anlagen für gewerblich-industrielle Zwecke basieren vorwiegend auf dem Prinzip Kompogas (Feststoffvergärung). In der Landwirtschaft werden Flüssigvergärungsanlagen gebaut, die flüssigen Hofdünger (Gülle), gemischt mit zusätzlichen organischen Zusatzstoffen (Co-Substraten), zur Produktion von Biogas nutzen. Von Landwirtschaftsbetrieben ohne Tierhaltung, welche keine flüssigen Hofdünger zur Verfügung haben, besteht die Nachfrage nach Vergärungsanlagen, die feste, stapelbare organische Reststoffe direkt verwerten können. Diese Anlagen werden aufgrund des höheren Trockensubstanzgehaltes des Inputmaterials als Feststoffvergärungsanlagen bezeichnet. Derzeit werden schon solche Feststoffvergärungsanlagen im In- und Ausland betrieben. Entsprechende Erfahrungen und Erkenntnisse aus Projekten im In- und Ausland sollen ausgewertet werden.

Die Studie zeigt, dass es derzeit eine Vielzahl von Verfahren im Bereich der Feststoffvergärung gibt, welche in der Abfallwirtschaft zur Entsorgung von Biomüll und in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Kontinuierlich betriebene, gewerblich-industrielle Verfahren, welche bisher nur in der Abfallentsorgung eingesetzt wurden, werden seit Kurzem auch für landwirtschaftliche Bedürfnisse, vorwiegend zur Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen, angepasst. Die Vergärung von organischen Feststoffen ist heute auch bei Flüssigvergärungsanlagen Stand der Technik. Aufgrund tendenziell tieferer Gestehungskosten für Strom sind Flüssigvergärungsanlagen heute konkurrenzfähiger als Feststoffvergärungsanlagen. Die Feststoffvergärung wird jedoch als Technologie mit hohem Entwicklungspotential gesehen. In Deutschland wird diese Technologie derzeit gefördert, damit der wirtschaftliche Betrieb auch in der Landwirtschaft möglich ist. In der Schweiz bestehen derzeit Rahmenbedingungen (Gesetzgebung, Betriebsstrukturen etc.), die eine spezielle Förderung der Feststoffvergärung nicht vorsehen. Deshalb sind die Flüssigvergärungsanlagen für den Einsatz in der Landwirtschaft derzeit der Feststoffvergärung tendenziell vorzuziehen.

Abwärmenutzung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen [7]: In der Schweiz waren im Jahr 2006 80 landwirtschaftliche Vergärungsanlagen in Betrieb. In diesen Anlagen werden der hofeigene Dünger vergärt, teilweise zusammen mit von Dritten angelieferten organischen Reststoffen. Das so gewonnene Biogas wird auf rund 50 landwirtschaftlichen Betrieben in WKK-Anlagen in Strom und Wärme umgewandelt. Aus der im Biogas enthaltenen Energie entstehen bei der Umwandlung in einer Wärmekraftkopplungs-Anlage rund 35 % Strom und 48 % Wärme. Die restlichen 17 % sind Umwandlungsverluste. Im besten Fall können also rund 83 % der im Biogas enthaltenen Energie genutzt werden, wobei der Eigenbedarf der Biogasanlage noch abgezogen werden muss. Der Strom von Biogasanlagen kann problemlos genutzt werden: ein Teil wird auf dem Betrieb eingesetzt und die überschüssige Menge ins öffentliche Netz eingespeist. Bei der Wärme hingegen sieht es anders aus. Neben der benötigten Wärme zum Heizen des Fermenters der Vergärungsanlage sowie für die Warmwasseraufbereitung und das Heizen der Räume auf dem Hof, bleibt oft ein ungenutzter Wärmeanteil übrig. Die in landwirtschaftlichen Biogasanlagen anfallende Abwärme soll besser genutzt werden. Eine erste Vorabklärung zeigt Möglichkeiten einer verbesserten Abwärmenutzung auf. Diese Varianten sollen im Rahmen eines Folgeprojekts verifiziert, ggf. ergänzt und bewertet werden. Die viel versprechendsten Lösungen sind unter Berücksichtigung der Gegebenheiten in der Landwirtschaft vertieft zu untersuchen.

Bestimmung der TS- und OS-Gehalte von Ausgangsmaterialien für die Feststoffvergärung [8]: Ziel des vorliegenden Projekts ist es, den TS- und OS-Gehalt von Ausgangsmaterialien für die Feststoffvergärung zu erfassen. Die Untersuchungen sollen statistisch klar abgegrenzte Bereiche für verschiedene Materialien, wie Grüngut, Haushaltsabfälle und Speisereste aus der Gastronomie liefern, wobei auch weitere Einflussfaktoren, wie Wetterlagen etc. berücksichtigt werden. Diese Erkenntnisse dienen als Grundlage für LCA oder ähnliche vergleichende Analysen.

Einfluss der Biogasproduktion auf die Keimfähigkeit von Beikrautsamen [9]: Die Verbreitung von Beikrautsamen über die Gülle kann auf Landwirtschaftsbetrieben mit Biogasproduktion ein besonderes Problem darstellen. Bei der Vergärung werden verschiedenste Substrate eingesetzt, welche naturgemäss einen hohen Besatz an keimfähigen Samen aufweisen (z.B. Grüngut, Getreideabgänge). Im Rahmen dieser Semesterarbeit der Berner Fachhochschule sollte deshalb abgeklärt werden, wie die Keimfähigkeit von Beikräutern und anderen Problempflanzen durch den Gärungsprozess beeinflusst wird. Die Resultate der Untersuchungen ergaben, dass die Ver-

gärung im Biogasfermenter die Samen von Raps, Raigras und Buchweizen nach 24 Stunden keimfähig machte. Samen von Blacken, Melden und Amaranth keimten nach einer Verweildauer von 72 Stunden im thermophil betriebenen Fermenter nicht mehr. Die nicht mehr keimfähigen Samen zeigten häufig eine aufgeplatzte Schale und einen breiigen Kern. Die hohe Temperatur der Gülle kann als Hauptgrund für die rasche Abnahme der Keimfähigkeit genannt werden. Der Zusatzversuch mit dem 49 °C warmen Wasser-

bad hat gezeigt, dass die Keimfähigkeit aller verwendeter Arten nach 72 Stunden Verweildauer null Prozent beträgt. Obwohl die Beikrautsamen robuster sind als die Samen der Kulturpflanzen, zeigen die Resultate, dass spezifische Arten nach Durchlauf einer thermophilen Biogasanlage mit Nachgärraum nicht mehr keimfähig sind. Diese Biogasgülle kann also ohne Bedenken bezüglich ungewünschter Verbreitung von Beikräutern und anderen Problempflanzen auf die Felder ausgebracht werden.

Nationale Zusammenarbeit

Die meisten Projekte bilden Zusammenarbeiten der Industrie mit diversen Fachhochschulen, den ETHs oder privaten Organisationen. Dieses Vorgehen erlaubt einen effizienten Technologietransfer von der Forschung in die Wirtschaft. Ausserdem wird laufend mit anderen Bundesämtern wie z.B. BAFU, BLW und ARE zusammengearbeitet. Die Finanzierung von Projekten wird – nicht zuletzt wegen erhöhtem Budgetdruck – möglichst breit abgestützt. Solange die gesetzlichen Rahmenbedingungen beim Bau von Verbrennungs- und Vergärungsanlagen ohne grosse Schwierigkeiten eingehalten werden können, sind neue Forschungsarbeiten mit dem Ziel, tiefere Emissionen und Kosten sowie höhere Wirkungsgrade zu erreichen, mit privaten Unternehmen schwierig zu realisieren. Für neue kostspielige und risikoreiche Entwicklungsprojekte fehlen der Industrie oft die

Mittel, d.h. es müssen neue Finanzierungsmöglichkeiten, beispielsweise in Form eines Fonds, angestrebt werden. Hinzu kommt, dass die Branche – insbesondere im Bereich übrige Biomasse (ohne Holz) – finanziell noch nicht sehr potent ist.

Die Zusammenarbeit mit der Begleitgruppe Biomasse (BioBG) hat sich gut etabliert. Die aus den Gesprächen mit den Forschenden «an der Front» gewonnenen Erkenntnisse sollen unter Mitwirkung der BioBG in das neue Forschungskonzept 2008-2011 des Bundes einfließen.

Weitere Ausbildungs-, Informations- und Imageprojekte zur Verwendung der Ressource Biomasse finden über die Biomasse-Partner des Aktionsprogramms *EnergieSchweiz* statt (www.holzenergie.ch, www.biomasseenergie.ch) und (www.holzenergie-symposium.ch).

Internationale Zusammenarbeit

Die Schweiz beteiligte sich auch im Berichtsjahr im Rahmen des Implementing Agreements Bioenergy der International Energy Agency (IEA) an 3 Projekten:

- **Biomass Combustion and Co-firing** [25]
- **Thermal Gasification of Biomass** [26]
- **Energy from Biogas and Landfill Gas** [27]

Ziele sind die Förderung des Erfahrungs- und Informationsaustauschs, die Verbreitung der Informationen zur Produktion und Verwendung der verschiedenen Biomassesortimente und Umwandlungstechnologien, die Anregung neuer Projekte in den Bereichen Forschung, Entwicklung, Pilot- und Demonstrationsanlagen sowie die Markteinführung.

Die **EU** nimmt ebenfalls eine wichtige Rolle ein. Im Bereich *Biomasse* beteiligt sich die Schweiz an verschiedenen Projekten, sie können über folgende Links eingesehen werden:

- **Biotreibstoffe** [2] und [3]: www.renew-fuel.com
- **Gasification Network** [26]: <http://www.thermalnet.co.uk/>
- **QM-Holzheizwerke** [25]: www.qmholzheizwerke.ch

Pilot- und Demonstrationsprojekte

VERFAHRENSOPTIMIERUNG

Bemerkung: Aufgrund der fehlenden Budgets können seit längerem vom BFE keine neuen Projekte mehr unterstützt werden. In der Folge werden einerseits noch laufende BFE-Projekte aufgeführt und andererseits neu geplante bzw. realisierte innovative Projekte ohne BFE-Beteiligung beschrieben.

ANALYSE UND OPTIMIERUNG STOFFFLUSS

MBR-Pilot [36]: Die Pilotanlage wurde als Membranbioreaktor (MBR) konzipiert und konnte Ende 2006 ihren Betrieb aufnehmen. Ihre Verarbeitungskapazität liegt vorerst bei rund 20'000 bis 25'000 Jahrestonnen. Davon werden rund 8'000 Tonnen Gülle aus dem eigenen Schweinemast- und zuchtbetrieb vergärt. Die restliche Biomasse sind Abfälle aus dem Lebensmittelhandel, der Nahrungsmittelproduktion und dem Gastgewerbe. Durch zwei getrennte Annahmelinien können sowohl hygienisch unbedenkliche als auch zu sterilisierende Abfälle professionell verarbeitet werden. Durch die installierte Membrantrenntechnik wird einerseits lebende Biomasse (Bakterien) in die Fermenter rückgeführt und andererseits das vergorene Material in wertvolle Düngerfraktionen aufgeteilt. Mehr als die Hälfte der verarbeiteten Materialien fällt anschliessend als Brauchwasser an und reduziert damit den Aufwand der Düngerrückführung in die Landwirtschaft erheblich. Die installierte Leistung liegt bei 1.1 MW elektrisch. Die Anlage wurde so konzipiert, dass ein weiterer Ausbau möglich ist. Die Investitionskosten liegen ohne Büro- und Lagertrakt bei rund 12.5 Mio. CHF.

NEUE UMWANDLUNGSTECHNOLOGIEN

SwissFarmerPower [37]: Der Kanton Luzern weist mit durchschnittlich über 200 und regional bis zu bis 400 GVE (Grossvieheinheiten) pro km² sehr hohe und im schweizerischen Mittel weit überdurchschnittliche Tierdichten auf. Diese hohen Tierdichten welche in Bezug auf Ammoniak- und Phosphoremissionen ein Problem darstellen, sind andererseits für die Biogasproduktion (z.B. mit anschliessender Aufbereitung als CO₂-neutrales Erdgassubstitut) eine optimale Voraussetzung. Im Berichtsjahr wurde der *SwissFarmerPower Inwil AG* die Baubewilligung für die grösste Biogasanlage in der Schweiz erteilt und im September konnte der Baustart erfolgen. Beteiligt sind nebst rund 80 Bauern, die *fenaco* (Unternehmensgruppe der Schweizerischen Agrarwirtschaft), die *Erdgas Zentralschweiz AG*, die *Weiherhus-Kompost AG* und die *CTU-Concepte Technik Umwelt AG*.

Biogasbetriebene Gelenkautobusse in Bern [38]: Das Gesamtprojekt Biogaserzeugung und

-einspeisung ins Erdgasnetz (ARA Bern), Lieferung an *BERNMOBIL* sowie Nutzung als umwelt- und klimafreundlichen Treibstoff im öffentlichen Verkehr besitzt Innovationskraft. Das vorliegende Projekt begleitet die Einführung der Gasbusse und zeigt im Sinne einer Erfolgskontrolle auf, wie weit der Zielbeitrag zu einer ökologischen Mobilität erreicht werden kann. Namentlich sind die CO₂-Bilanz, energetische Wirkungen und der lufthygienische Nutzen aufzuzeigen. Gleichzeitig sind die Kosten, die technischen und betrieblichen Erfahrungen sowie die daraus ableitbaren Lektionen aufzuzeigen. Die Erfahrungen sollen anderen interessierten Städten zur Verfügung stehen und Anregung und Hilfestellung sein. Im Berichtsjahr wurde das Messkonzept fertig gestellt und mit ersten Messungen/Erhebungen begonnen. Allerdings haben grössere Probleme insbesondere im Bereich der Betankung zu Verzögerungen im Projekt geführt.

Biomass-Combined-Cycle (BCC): Entwicklung und Feldtest eines Biomasse-Kombi-Kraftwerks mit extern befeuerter Gasturbine (EFGT) und Abwärmenutzung (ORC) [18]. Die EFGT in Rümlang ist eine Heissluft-Turbine mit 100 kWe Spitzenleistung und 80 kWe Dauerleistung. Es handelt sich um eine so genannte Mikroturbine, bei der aber statt einer Brennkammer ein Hochtemperatur-Wärmetauscher die nötigen Temperaturen erzeugt. Die immer noch heissen Abgase der Turbine werden ins Holzfeuer eingeblasen und helfen dort Brennstoff zu sparen. Dieses vorgewärmte Holzfeuer beheizt den oben erwähnten Wärmetauscher. Dieses denkbar einfache, robuste und relativ wartungsarme Konzept ermöglicht einen vergleichbar hohen elektrischen Wirkungsgrad von rund 20% und stellt dabei die Abgase auf hohem Temperatur-Niveau (280 °C) für eine weitere Nutzung zur Verfügung. Diese Temperatur ist genügend hoch, um Fernwärme und Prozessdampf herstellen zu können, oder wie im Falle des Forschungsprojekts BCC eine Abwärme-Verstromungsanlage mit ORC-Prinzip zu betreiben. ORC ist ein geschlossener Dampfturbinen-Prozess, welches anstatt mit Wasser mit einem organischen (meist alkoholischen) Medium betrieben wird.

Die Holzvergasungstechnologie kann sich aufgrund besserer Rahmenbedingungen wie der kostendeckenden Einspeisevergütung im Markt etablieren. Die Anlage *Woodpower* [32] ist in der Optimierungsphase und eine Anlage von *Pyroforce* ist seit Herbst 07 in der Inbetriebnahmephase. Diese Anlagen können gemäss der Studie **Erarbeitung von Grundlagen für die Zertifizierung von Strom aus Holz-WKK mit Festbett-Gleichstrom-Vergaser** [31] Ökostrom liefern.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

- Qualitätssicherung:
 - Kompost-/Gärgut-Projekte: die Arbeiten sind abgeschlossen und die Erkenntnisse werden anlässlich des wissenschaftlichen Kongresses CODIS im Februar 2008 vorgestellt.
 - landwirtschaftliche Biogasanlagen mit Co-Vergärung: eine Studie zum Thema Klein-Biogasanlagen konnte abgeschlossen werden; eine Untersuchung der Monovergärung von Glycerin ist noch in Arbeit.
 - Sicherheit von landwirtschaftlichen Biogasanlagen: eine erste Übersicht / Auslegeordnung konnte erstellt werden; weitere vertiefte Abklärungen folgen.
 - Die Projekte über Feinstaub und Systemoptimierungen liefern Grundlagen zur Qualitätssicherung sowie auch Qualitätsförderung von Feststofffeuerungen. Einige Erkenntnisse sollen am kommenden Holzenergie-Symposium vorgestellt werden.
- Neue Technologien:
 - hydrothermale Vergasung: die Inbetriebnahme einer Laboranlage mit kontinuierlicher Biomassezufuhr ist mit Verspätung erfolgt; das Konzept der Salzausschleusung funktioniert grundsätzlich, mit realer Biomasse sind aber noch grosse Probleme zu lösen (Verkokung, vorzeitige Gasbildung); das Projekt ist abgeschlossen; in einem Folgeprojekt soll die Hydrolyse und die Salzabtrennung optimiert werden.
 - Eine interessante Option zu den Holzvergäsern im unteren Leistungsbereich ist die Heissluftturbine von Talbott. Im laufenden Jahr werden sich die Vor- und Nachteile aufzeigen lassen.
 - Die Verbrennungsversuche anderer Biomasse als Holz konnte erfolgreich durchgeführt und dokumentiert werden. Offene Fragen betreffen die Einhaltung der Luftreinhalteverordnung und die Zuführung und die Vermischung der verschiedenen Biomassen.
- Ökobilanz von Energieprodukten
 - Das Projekt konnte mit einer Verspätung abgeschlossen werden; der Schlussbericht der EMPA mit der Bewertung verschiedener Biotreibstoffe wurde publiziert.

Umfassend beurteilt konnte das Forschungskonzept 2004-2007 unter Berücksichtigung der finanziellen Mittel erfolgreich umgesetzt werden. Die Erkenntnisse der Resultate wurden mit den Projekten in Zusammenarbeit mit der Industrie, an diversen Veranstaltungen und über die Program-

maktivitäten von EnergieSchweiz in die Wirtschaft transferiert. Im Bereich der Pilot- und Demonstrationsanlagen wurden in der letzten Legislatur die Budgets drastisch reduziert, so dass keine neuen Projekte gestartet werden konnten.

Weitere Vorhaben:

- Forschungsprogramm Biomasse 2008-2011 (CORE-Konzept) ist in Arbeit;
- Biomassestrategie: Auslegeordnung liegt vor, Entwurf Grobstrategie in Arbeit.

Allgemeine Betrachtungen:

Verbrennung: Die Verbrennung ist nach wie vor die wichtigste Technik zur energetischen Nutzung von Holz und gleichzeitig die einzige mit bewährten Anlagen und bedeutender Verbreitung. Die Feinstaub- und Stickoxidemissionen sowie die Kosten und Komfortansprüche der Betreiber sind die Hauptthemen zur weiteren Verbreitung. Im Berichtsjahr blieben die konventionellen Energiepreise auf hohem Niveau. Dies hatte zur Folge, dass sich auch die Energieholzpreise angeglichen haben und sich die Wirtschaftlichkeit kaum verbessert hat. Trotzdem konnten vor allem automatische Feuerungen gut verkauft werden. Die aktuellen Diskussionen über Feinstaubmissionen zeigen nun die Wichtigkeit der Qualitätsförderung und -sicherung von Brennstoff, Planung, Betrieb und Unterhalt von Holzheizungen.

Vergasung: Um Vergasersysteme für die Wärme-Kraftkopplung im Leistungsbereich kleiner 1 MW zügig weiter zu entwickeln, müssen die nächsten Pilotanlagen realisiert werden können. Dies bedingt jedoch gute Standorte, Einsatz und Wille aller Beteiligten. Mehrere Holzvergäser-Anlagen sind bereits in Planung und einige kommen nächstens in Betrieb.

Vergärung: Das Interesse am Bau von landwirtschaftlichen Biogasanlagen hat im Berichtsjahr erneut stark zugenommen. Dies nicht zuletzt im Hinblick auf die Kosten deckende Einspeisevergütung. Sehr positiv zu werten ist aber auch das Engagement von *Coop Naturaplan*. Im Rahmen des Projekts *Naturaplan_Biogas50* sollen in 5 Jahren rund 50 landwirtschaftliche Biogasanlagen unterstützt werden.

Die Teilrevision der Raumplanungsgesetzgebung ist im September 2007 in Kraft getreten. Sie sieht unter anderem eine zonenkonforme Bewilligung von Anlagen zur Erzeugung von Energie aus Biomasse in der Landwirtschaft vor. Diese Änderung ist für landwirtschaftliche Biogasanlagen wichtig, denn die Erfahrung zeigt, dass sie zurzeit nur wirtschaftlich betrieben werden können, wenn sie vollständig in den Landwirtschaftsbetrieb integriert sind und Co-Vergärung betreiben können.

Insbesondere für landwirtschaftliche Betriebe ist die Verstromung von Biogas die einfachste und zurzeit ökonomisch interessanteste Variante. Im Vollzug gibt es aber zurzeit noch offene Fragen, die es noch zu klären gilt.

Im Zusammenhang mit der neuen **Biomasse-Potenzialstudie** [40] stellt sich die Frage, welche Strategie zur Nutzung der verschiedenen Biomassesortimente verfolgt werden soll. Welche Sortimente sollen beispielsweise für welche Energieprodukte (Strom, Wärme, Treibstoff oder entsprechende Kombinationen) verwendet werden? Welche Technologien sind dazu geeignet? Wie ist

ein maximaler Gesamtnutzungsgrad erreichbar und welchen Beitrag leisten die übrigen erneuerbaren Energien? Diese Fragen werden im Rahmen einer umfassenden Biomasse-Strategie beantwortet. Die entsprechenden Grundlagen sind entweder bereits vorhanden oder stehen kurz vor Abschluss (Potenzialstudie, Energie-Perspektiven, Ökobilanz von Energieprodukten, Wirtschaftlichkeit von Biomasseanlagen, Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk für die Schweiz, dezentrale Stromerzeugung mit Feststoff-Biomasse). Eine erste Auslegeordnung konnte im Berichtsjahr erstellt werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 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] N. Jungbluth (jungbluth@esu-services.ch), ESU-services, Uster und R. Zah (rainer.zah@empa.ch), EMPA Dübendorf: a) **Vorstudie «Ökobilanz von Energieprodukten»** (SB Projekt 100'653) • b) **Life Cycle Inventories of Bioenergy** (SB Projekt 100'653) • c) **Hauptstudie «Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen»** (SB Projekt 100'653) • d) **ART-Bericht «Ökobilanz von Energieprodukten: Bewertung der landwirtschaftlichen Biomasse-Produktion»** (SB Projekt 100'653) • e) Schlussbericht Projektleitung (SB Projekt 100'653) (<http://www.esu-services.ch/>; <http://www.empa.ch/>; <http://www.art.admin.ch/>)
- [2] N. Jungbluth (jungbluth@esu-services.ch), ESU-services, Uster: **RENEW – Life Cycle Assessment for BTL-fuel production** (-) (<http://www.renew-fuel.com>)
- [3] S. Biollaz (serge.biollaz@psi.ch), PSI Villigen: **Design und Optimierung der Hochtemperatur-Entschwefelung für den Prozess «Methan aus Holz»** (-)
- [4] A. Prevôt (andre.prevot@psi.ch), PSI Villigen: **Erweiterte Partikelanalytik für Holzfeuerungen** (JB)
- [5] S. Hammer (stephan.hammer@infras.ch), Infras Zürich: **Strategie zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz, Auslegeordnung** (-)
- [6] C. Müller und B. Liesch (info@ines-energy.ch), INES Ingenieurbüro für nachhaltige Energiesysteme, Bern: **Feststoffvergärung in der Schweiz** (SB Projekt 101'639)
- [7] M. Sommerhalder (markus.sommerhalder@ebp.ch), Ernst Basler + Partner AG, Zollikon: **Abwärmenutzung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen** (SB Projekt 102'315)
- [8] W. Edelmann (info@arbi.ch), arbi GmbH, Baar: **Bestimmung der TS- und OS-Gehalte von Ausgangsmaterialien für die Feststoffvergärung** (JB)
- [9] K. Burgermeister, Berner Fachhochschule, Zollikofen: **Einfluss der Biogasproduktion auf die Keimfähigkeit von Beikrautsamen** (SB Projekt 102'071)
- [10] F. Vogel (frederic.vogel@psi.ch), PSI Villigen: **Biogenes Methan durch hydrothermale Vergasung** (SB Projekt 100'131) (<http://www.psi.ch/>)
- [11] M. Meyer (martin.meyer@shl.bfh.ch), Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, SHL, Zollikofen: **Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes im unteren Leistungsbereich mit eigener Ölmühle** (JB und ZB für KTI) (<http://www.shl.bfh.ch/>)
- [12] Hersener/Meier (hersener@agrenum.ch), ARGE UF-Membran, c/o Ingenieurbüro HERSENER, Wiesendangen: **Vergärung von Gülle und Co-Substraten im Membran-Bioreaktor (Forschung, Pilotanlage und Messkampagne)** (SB Projekt 100'517)
- [13] Y. Membrez et al. (yves.membrez@erep.ch), EREP, Aclens: **Développement d'un concept combiné de production de biogaz et d'élimination de l'ammoniac appliqué aux effluents agricoles** (SB Projekt 101'290)
- [14] E. Casartelli (ecasartelli@hta.fhz.ch), HTA, Luzern: **Strömungstechnische Optimierung eines Biomasse-Rührwerks** (SB Projekt 101'847)
- [15] M. Spicher (spicher@genesys.ch), Genesys GmbH, Frauenfeld: **Monovergärung von Glycerin** (JB)
- [16] F. Reutlinger (reutlinger@genesys.ch), Genesys GmbH, Frauenfeld: **Klein-Biogasanlagen in der Landwirtschaft** (SB Projekt 101'999)
- [17] C. Fermaud (charles.fermaud@ebp.ch), Ernst Basler + Partner AG, Zollikon: **Sicherheit von landwirtschaftlichen Biogasanlagen** (SB Projekt 102'296)
- [18] M. Schmid (schmid@oekozentrum.ch), Ökozentrum, Langenbruck: **Emissionsarme Verbrennung und energetische Nutzung von Schwachgasen bis unter 2.5 MJ/m³** (JB) • b) **Biomass-Combined-Cycle** (JB)
- [19] W. Edelmann (info@arbi.ch), arbi GmbH, Baar: **Entwicklung einer Biogasanlage in Holzbauweise** (SB BAFU, Technologieförderung)

- [20] T. Kupper (thomas.kupper@eawag.ch), EAWAG, Dübendorf: **Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz** (<http://www.bafu.admin.ch/abfall/01472/01480/01742/index.html?lang=de>)
- [21] J. Fuchs (jacques.fuchs@fibl.ch), FiBL, Frick: **Auswirkungen von Komposten und Gärgut auf die Umwelt, Bodenfruchtbarkeit und Pflanzengesundheit** (<http://www.bafu.admin.ch/abfall/01472/01480/01742/index.html?lang=de>)
- [22] U. Baier (urs.baier@zhaw.ch), ZHAW Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wädenswil: **Methanverluste bei der Biogasaufbereitung** (JB und Artikel im gwa⁴ 9/2007)
- [23] U. Baier (urs.baier@zhaw.ch), ZHAW Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wädenswil: **Massen- und Energieflussanalyse biogener Güter in der Schweiz (Update 2007)** (-)
- [24] J. Wochele (joerg.wochele@psi.ch), PSI Villigen: **Oberflächen-Ionisationsdetektor zur Online-Messung von Alkalien in Prozessgasen (MOPSID: Monitoring of Process Gases with a Surface Ionization Detector)** (JB)
- [25] Th. Nussbaumer (thomas.nussbaumer@verenum.ch), Verenum, Zürich: a) **IEA, Implementing Agreement Bioenergy, Task 32: Biomass Combustion and Co-Firing** (JB) (<http://www.ieabcc.nl/>) • b) **Low-Particle Unterschubholzfeuerung** (JB) • c) **Partikelemissionen von Holzfeuerungen bis 70 kW** (JB)
- [26] R. Bühler (rbuehler@mus.ch), Maschwanden: a) **IEA, Implementing Agreement Bioenergy, Task 33: Thermal Gasification of Biomass** (JB) (<http://www.gastechnology.org/webroot/app/xn/xd.aspx?it=enweb&xd=iea/homepage.xml>) • b) **Thermische Nutzung anspruchsvollen Biomassebrennstoffe** (JB)
- [27] A. Wellinger (arthur.wellinger@novaenergie.ch), NOVA ENERGIE, Aadorf: **IEA, Implementing Agreement Bioenergy, Task 37: Energy from Biogas and Landfill Gas** (JB) (<http://www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37/index.htm>)
- [28] L. Konersmann (info@solarenergy.ch), SPF Rapperswil: **Pelletsolar** (JB)
- [29] H.R. Gabathuler (gabathuler.ag@bluewin.ch), Diessenhofen: **Regelkonzepte für bivalente Holzheizungsanlagen** (JB)
- [30] T. Griffin, H. Burtscher (timothy.griffin@fnw.ch), Muttenz: **Evaluation von Messverfahren zur Messung der Wirksamkeit von Partikelabscheidern bei kleinen Holzfeuerungen** (JB)
- [31] H. Gemperle (www.pyroforce.ch), Emmenbrücke: **Vergaseranlage Pyroforce** (JB)
- [32] Oliver Bosshard (o.bosshard@woodpower.ch), Wila
- [33] C. Gaegauf, M. Schmid (www.oekozentrum.ch), Langenbruck: a) **Bio-Pro** (JB) • b) **Biopoly-Heat (SB) Brennkammer für Holzfeuerstätten mit geringen Partikelemissionen** (JB)
- [34] U. Oester (info@apex.eu.com), Apex AG, Däniken: **Aufbereitungs- und Betankungsanlage für kleinere Biogasproduktionsmengen** (JB).
- [35] Urs Elber (www.visionpellets.ch), Wangen: **Feuchtegehalt-Änderung des Waldfrischholzes bei der Lagerung im Wald** (SB Projekt 101'410)

Liste innovativer P+D-Projekte

- [36] Jakob Bösch AG, Schwellbrunn und Hersener/Meier (hersener@agrenum.ch), ARGE MBR, c/o Ingenieurbüro HERSENER, Wiesendangen: kein separater SB, sondern zusammen mit [12]
- [37] U. Brücker (ub@itz.ch), ARGE Swiss Farmer Power, Horw: **SwissFarmerPower «Biogas vom Bauer wird zum Treibstoff von morgen»** (www.swissfarmerpower.ch)
- [38] P. Maurer (peter.maurer@bernmobil.ch), Bernmobil, Bern: **Biogasbetriebene Gelenkautobusse in Bern** (-)

Referenzen

- [39] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 bis 2007**, ausgearbeitet durch die Eidg. Energieforschungskommission CORE, 1. Januar 2004 (www.energieforschung.ch)
- [40] **Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz**, BFE, Dezember 2004
- [41] **Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas**, Edelman et al., BFE Projekt 35'408, 2001

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

PROGRAMM KLEINWASSERKRAFTWERKE FORSCHUNGSPROGRAMM WASSERKRAFT

Martin Bölli, Klaus Jorde

boelli@smallhydro.ch, jorde@entec.ch



Installation eines Messflügels zur Strömungsmessung

Im Rahmen des Projekts «Optimierung von Kleinwasserkraftwerken durch Qualitätssicherung» werden verschiedene Parameter eines Kleinwasserkraftwerks überprüft.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Programm Kleinwasserkraftwerke umfasst seit 2004 eigene Forschungsaktivitäten. Dabei wurde in der Planung 2004-2007 bewusst auf den Aufbau von Kleinwasserkraft-Wissen in marktnahen Bereichen gesetzt. Eine wichtige Position im Forschungsprogramm nehmen deshalb kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) und private Organisationen ein.

Auch die Fachhochschulen, die ETH Lausanne, die Universität Bern und die Universität Stuttgart arbeiten an Projekten des Forschungsprogramms Kleinwasserkraftwerke. Die Hochschulen beteiligen sich an Projekten, in denen vertieftes Expertenwissen direkt in technische Problemlösungen einfließen soll, namentlich im Bereich der **hydraulischen Maschinen**. Sie leisten auch einen wichtigen Beitrag bei der **Grundlagenforschung** und bei der **Qualitätssicherung** – Bereiche, die traditionell eher nicht von einzelnen KMU bearbeitet werden.

Ziel des Forschungsprogramms Kleinwasserkraftwerke 2004-2007 [10] ist es, Innovation und Knowhow im Schweizer Kleinwasserkraft-Sektor zu stärken. Damit sollen kostengünstige, angepasste Lösungen für jene Potenziale entwickelt werden, welche zurzeit noch nicht wirtschaftlich erschlossen werden können.

Prioritäre Forschungsgebiete sind:

- Optimierte Turbinen / Pumpen als Turbinen
- Niederdruck-Innovationen

- Steuerungs- und Messtechnik
- Drehzahlvariable Technologien
- CFD / numerische Strömungssimulationen
- Statistiken und Potenzialstudien

Im Berichtsjahr wurde das Forschungsprogramm erneut gemeinsam mit den *EnergieSchweiz*-Aktivitäten unter dem Label *Programm Kleinwasserkraftwerke* durchgeführt. Für weitere Informationen sei auf den *EnergieSchweiz*-Jahresbericht [13] und auf das Positionspapier [14] BFE zur Kleinwasserkraft verwiesen. Gleichzeitig wurde unter der Federführung von Klaus Jorde ein neues Forschungsprogramm Wasserkraft [15] ausgearbeitet, welches ab 2008 das bestehende Forschungsprogramm Kleinwasserkraftwerke ablöst und neu die gesamte Wasserkraft abdeckt. Der vorliegende Bericht berücksichtigt die im Rahmen des Vorprojekts erlangten Erkenntnisse.

Mit der Auslösung von drei neuen Projekten wurde das quantitative Ziel des Jahresplans [11, 12] übertroffen. Das letzte verbleibende P&D **Projekt TWKW Mettental** [9] konnte mit dem Schlussbericht nach einjährigem Betrieb abgeschlossen werden.

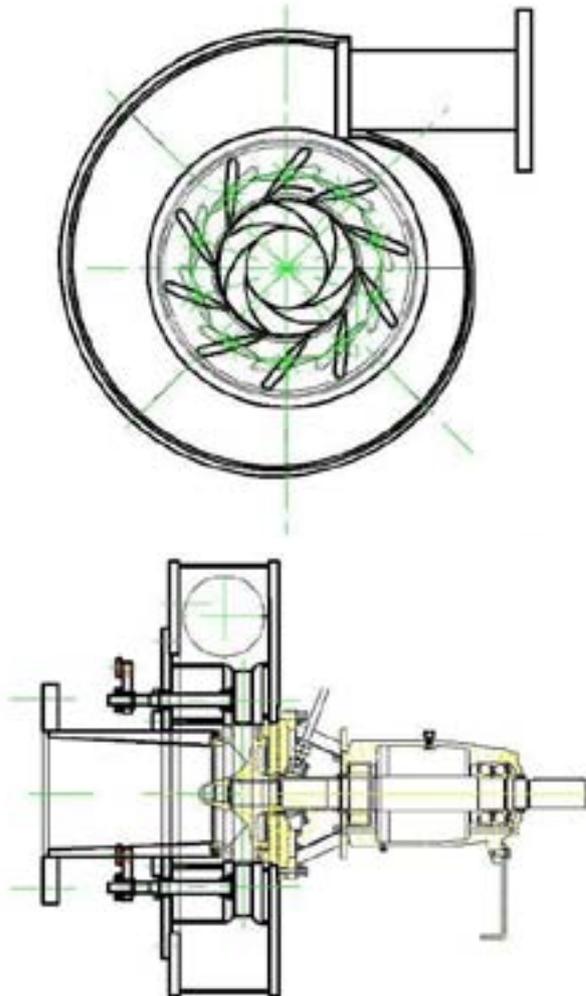
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

Nicht erwähnt sind in diesem Bericht die von den Forschungsstätten durchgeführten Projekte, welche ohne BFE-Beiträge von der Elektrizitätswirtschaft oder anderen öffentlichen Stellen direkt finanziert wurden. Es sei hier auf die Jahresberichte der Forschungsinstitute und der entsprechenden Förderorganisationen hingewiesen (z.B. *swisselectric research*).

OPTIMIERTE TURBINEN / PUMPEN ALS TURBINEN

Gleich 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 Wasserversorgung** [5] 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 Turbinie-

rung einen Restdruck bereitstellt. Bis anhin wurden für diese Anwendungen Pumpen eingesetzt, die rückwärts betrieben wurden (d.h. das Wasser fließt 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. Das Turbinenrad wird in einen luftdicht geschlossenen Raum eingebaut. Ein Luftdruckkissen 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 Druckluftkissen dämpft und absorbiert auch Druckstöße im Leitungsnetz.



Figur 1: Einbau eines Leitapparats in eine Standardpumpe (Bild: JMC Engineering – J.-M. Chappallaz Ing EPFL)

Die Verwendung von Pumpen als Turbinen bietet viele Vorteile. Derartige serienmässig hergestellte und geringfügig veränderte Pumpen sind sehr kostengünstig. Ihr Anwendungsgebiet ist jedoch beschränkt, da sie nur bei fixem oder leicht variablem Durchfluss funktionieren. JMC hat im Rahmen des Projekts **Pumpen als Turbine mit verstellbarem Leitapparat (PAT-Francis)** [3] die Umwandlung von als Turbinen gebrauchten Pumpen (PAT) in Turbinen mit variablem Durchfluss (PAT-Francis) erforscht. Dazu wird das Spiralgehäuse der Pumpe demontiert und durch ein neues, mit einem Leitapparat mit verstellbaren Schaufeln versehenes Gehäuse ersetzt, wie er in den Francis-Turbinen zum Einsatz kommt (Figur 1). Mit diesem Leitapparat kann der Durchfluss in Abhängigkeit der gewünschten Parameter reguliert werden: einem Niveau flussaufwärts, oder einem Druck flussabwärts, wenn die Turbine zur Druckreduktion eingesetzt wird. Weil das Spiralgehäuse der Pumpe nicht gross genug ist, um den Leitapparat aufzunehmen, wird es demontiert und entweder durch ein neues, massgefertigtes Spiralgehäuse aus maschinengeschweisstem Stahl oder durch ein Gehäuse einer grösseren Pumpe

ersetzt, wenn dies möglich ist. Das Pumpenrad wird beibehalten. Dies verringert die Kosten, im Vergleich zu einer vollständig massgefertigten Turbine. Mit diesen Veränderungen ist es möglich, eine Turbine herzustellen, die ähnlich funktioniert wie eine Francis-Turbine, aber bedeutend billiger ist. Ein weiterer Vorteil dieser Konstruktion ist, dass sie trotz des Einbaus eines Leitapparats immer noch als traditionelle Pumpe genutzt werden kann. In diesem Sinne ist sie vergleichbar mit den Pumpen-Turbinen, die in grossen Speicherkraftwerken zum Einsatz kommen.

Seit 1993 verfolgt das Kompetenzzentrum *MHyLab* das Ziel, kleine hydraulische Turbinen zu entwickeln, die den Kriterien Zuverlässigkeit, Einfachheit und Performance genügen. Alle Arbeiten zielen darauf ab, die sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch und technisch optimale Turbine für jedes Kleinwasserkraftwerk zu bestimmen. Bereits ausgereift sind Entwicklungen für den Bereich hohe Fallhöhen (60 bis 600 m), wo Pelton-Turbinen eingesetzt werden, und für den Bereich niedrige 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 verwendet, 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 **Turbinen Diagonales 06** [4] untersucht. Die gesamten F&E-Arbeiten basieren auf dem Prinzip der Systematisierung und laufen wie folgt ab:

1. Definition einer Basisturbine anhand der verwendeten Technik in der Grosswasserkraft,
2. Anpassungen an die Besonderheiten der Kleinwasserkraft und Definition der Dimensionierungsparameter
3. Überprüfung der Anpassungen und weitere Vereinfachung anhand von Informatik-Modellen
4. Bau einer Modell-Turbine im Labor und Installation auf dem Prüfstand
5. 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 des Durchflusses, des verfügbaren Gefälles, der Drehzahl der Turbine usw. 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.

NIEDERDRUCK-INNOVATIONEN

Im Niederdruck-Bereich sind in erster Linie neue Ansätze im Bereich der Strömungsturbinen zu vermelden. Untersuchungen zum Wirkungsgrad wurden im Rahmen des Projekts **Floating Turbine UEK Swiss Project – Feasibility study** [1] durch die ETH Lausanne an einer hydrokinetischen Propellerturbine der Firma UEK durchgeführt.

STATISTIKEN UND POTENZIALSTUDIEN

Eine umfassende Studie mit Aufnahme des Bestandes aktueller Kleinwasserkraft-Anlagen ist in Vorbereitung, ebenso wie die eigentliche Potenzialstudie. In zwei Vorprojekten wurde eine Methodik entwickelt, welche mittlerweile in Zusammenarbeit mit der Universität Bern weiter verfeinert wird. Die neue, beide Bereiche umfassende Studie soll im Laufe des Jahres 2008 im Rahmen des neuen Forschungsprogramms Wasserkraft ausgelöst werden.

Das Projekt **Kosten und Energiezuwachs Kleinwasserkraftwerke** [6] befasste sich – im Hinblick auf die Gestaltung der neuen kostendeckenden Einspeisetarife – mit den effektiven Baukosten von Kleinwasserkraftwerken, welche in den letzten Jahren realisiert wurden. Dazu wurden verschiedene Betreiber mittels Fragebogen kontaktiert, die Antworten ausgewertet und eine Empfehlung zu Händen des Bundesamtes für Energie formuliert.

WEITERE PROJEKTE

Das **Vorprojekt zur Optimierung von Kleinwasserkraftwerken durch Qualitätssicherung** [2] behandelte erstmals Qualitätsmängel bei Kleinwasserkraftwerken und deren Prävention. Das **Folgeprojekt** [7] befasst sich mit der Optimierung von Spülvorgängen bei Kleinwasserkraftwerken. 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 Treibgutanteil 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 Vorgehenswei-

se 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 sowie durch 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.



Figur 2: Ein Fisch wird der Reuse entnommen und vermessen (Bild: Entegra AG)

Die Funktionsweise einer neuartigen Fischaufstiegshilfe wird im Projekt **Monitoring der Fischschleuse des KW Buchholz** [8] geprüft. Konventionelle Fischaufstiegshilfen liessen sich bei der Stauanlage mit einer Höhe von 15m 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 (Figur 2) auch die Untersuchung von Kompensationswanderungen durch Einsetzen von Fischen im Unterwasser.

Nationale Zusammenarbeit

Die hier vorgestellten Projekte sind im Wesentlichen Kooperationsprojekte zwischen privaten und staatlichen Einrichtungen und privaten Unternehmen. Die Betreiber der Wasserkraftanlagen sind privatwirtschaftliche Personen oder Firmen, die Forschungsinstitutionen sind private Organisationen, Fachhochschulen und Universitäten. Da das Programm Kleinwasserkraftwerke nahe am Markt operiert, ist naheliegend, dass der Schwerpunkt der Aktivitäten in der angewandten Forschung angesiedelt ist, d.h. bei privaten Stiftungen und den Fachhochschulen. Dagegen ist der Anteil des ETH- bzw. Universitätsbereichs

eher gering. Es ist aber bemerkenswert, dass in diesem marktnahen Bereich derzeit bereits alle Bereiche privater und staatlicher Forschungseinrichtungen beteiligt sind.

Durch Erweiterung des Forschungsprogramms ab dem Jahr 2008 auf die gesamte Wasserkraft kann davon ausgegangen werden, dass neben den bisherigen Beteiligten zusätzlich auch die grossen Energieversorger und in verstärktem Mass auch die ETHs und Universitäten in die Aktivitäten eingebunden sein werden.

Internationale Zusammenarbeit

Das bisherige Forschungsprogramm Kleinwasserkraft basiert teilweise bereits auf internationaler Zusammenarbeit, zum Beispiel mit der Universität Stuttgart bei der Bearbeitung der Frage nach optimierten Spülprogrammen für Turbinen. Es wurde auch bereits erwähnt, dass MHyLabs-Turbinen in vielen verschiedenen Ländern zum Einsatz kommen. Für das zukünftige Forschungsprogramm Gesamtwasserkraft wird davon ausgegangen, dass internationale Kooperationen stärker Bestandteil des Programms werden. Die Themenschwerpunkte des geplanten Programms

beinhalten Fragen, die über Ländergrenzen hinweg angegangen werden sollten, beispielsweise die Auswirkungen von Klimaänderungen im Alpenraum auf die Stromerzeugung in Speicherkraftwerken oder den Geschiebeeintrag in alpine Speicher infolge Gletscherrückgang. Andere Fragestellungen sind so komplex, dass sie am besten im Rahmen internationaler Forschungsprojekte angegangen werden sollten, wie zum Beispiel die Schwall/Sunk Problematik. Der Anteil internationaler Projekte wird daher zukünftig zunehmen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Als letztes verbliebenes P+D Vorhaben konnte im Frühjahr 2007 das Projekt **Trinkwasserkraftwerk Mettental** [9] in Sachseln OW abgeschlossen werden. Die Ultra-Hochdruck-Anlage wurde

im Frühling 2005 in Betrieb genommen und die Betriebsdaten wurden über ein volles Betriebsjahr erfasst.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Das Berichtsjahr stand im Zeichen der Ablösung der Forschung im Rahmen des Programms Kleinwasserkraftwerke durch das Forschungsprogramm Wasserkraft. Nach dem Rücktritt von Manuel Buser übernahm Martin Bölli vorübergehend die Position des Forschungsprogrammleiters, um sie nun auf Anfang 2008 dem neuen Wasserkraft Forschungsprogrammleiter Klaus Jorde zu übergeben. Aufgrund dieser Situation war das Jahr 2007 auch auf die Weiterführung, respektive auf den Abschluss der bestehenden Projekte konzentriert.

Das neue Forschungsprogramm Wasserkraft wurde im November 2007 der Eidgenössische Energieforschungskommission CORE vorgestellt [15]. Die Kommission hat das Programm vorläufig akzeptiert und gleichzeitig eine Reihe von Ergänzungen und Änderungen in Auftrag gegeben, die bis November 2008 in das Programm zu integrieren

sind. Der Programmvorschlag sieht eine Reihe von Forschungsthemenswerpunkten vor. Dabei soll der Bereich Kleinwasserkraft im Wesentlichen wie bisher fortgeführt werden. Im Bereich Grosswasserkraft wird davon ausgegangen, dass die Betreiber grosser Wasserkraftwerke diejenigen Forschungsprojekte selbst finanzieren können, die ihre eigenen bestehenden oder geplanten Anlagen direkt betreffen. Wissenschaftliche Grundlagenforschung wird dabei selten betrieben, vielmehr geht es um die Lösung anstehender Fragen. Daneben gibt es aber Forschungsbedarf von strategischer Bedeutung für die Wasserkraftnutzung allgemein bzw. für den Standort Schweiz, die über die ohnehin stattfindenden Aktivitäten hinaus gehen und derzeit nicht von den privaten Betreibern in Zusammenarbeit mit den Fachhochschulen und Universitäten abgedeckt werden. Hier soll das neue Programm zusätzliche Impulse geben.

Insgesamt zielt das Programm darauf ab, die derzeitige Produktion aus Wasserkraft trotz Einbusen infolge Klimawandel und infolge ökologischer Auflagen mindestens zu erhalten. Darüber hinaus gibt es noch ungenutzte Potentiale in der Schweiz, die nach Auffassung der CORE genutzt werden könnten, wenn wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftspolitische Randbedingungen nicht dagegen sprechen. Auch ist es wichtig, die Rolle der Speicherkraftwerke in einem veränderten Strommarkt zu evaluieren, die sich daraus ergebenden technischen Fragestellungen grundsätzlich zu klären, Betriebshoheiten zu erörtern und Vergütungsmechanismen neu zu bewerten. Neben den Auswirkungen des Klimawandels gehört die grundsätzliche Klärung ökologischer Fragen, wie Schwall/Sunk, zu den dringenden Fragen. Hier soll das Forschungsprogramm Wasserkraft zusätzliche und neue Impulse geben und helfen,

grössere, institutionell und international vernetzte Forschungsprojekte zu unterstützen. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenfassung der bisher geplanten Forschungsbereiche, die aber noch konkretisiert werden sollen. Mitbestimmend für die Lancierung eines umfassenden Forschungsprogramms Wasserkraft war auch die Absicht, das Know-How der Schweizer Hochschulen und Industrie in diesem Gebiet zu festigen und auszubauen.

Das Jahr 2008 wird dazu verwendet, das Forschungsprogramm und seine Schwerpunkte für die Grosswasserkraft nach den Vorgaben der CORE zu konkretisieren, messbare Programmziele festzulegen, alle Beteiligten über das Programm zu unterrichten und ihr Interesse zu wecken, internationale Kooperationsmöglichkeiten auszuloten sowie erste Forschungsprojekte aufzuleisen.

Tabelle 1: Forschungsschwerpunkte Wasserkraft

Fachbereich	Grosswasserkraft	Kleinwasserkraft
Bautechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Schacht- und Stollenauskleidungen zur Reduktion der Stahlpanzerung • Korrosionsschutzerneuerungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinwasserkraftwerke ohne Turbinenhaus • Erforderliche Rohrleitungsquerschnitte bei Wasserversorgungsanlagen
Maschinen- und Anlagentechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Pumpturbinen bei häufigem Wechsel der Betriebsweise 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierte Turbinenkonzepte für Kleinstkraftwerke • Wirkungsgradverbesserungen bei Komponenten für Kleinstkraftwerke • Strömungsenergie ohne Stauanlagen • Simulationstools zur Systemoptimierung • Neue Komponenten wie Umrichter, wartungsfreie Aktuatoren, ausfallsichere Sensoren • Lösungen und Standards für Betriebsoptimierung und Fernbetrieb, integrierte Leitsysteme
Betrieb und Unterhalt	<ul style="list-style-type: none"> • Wartungsfreie Rechen und Reiniger • Verbesserte Spülprogramme für Turbinen bei hohem Geschwemmselanfall 	<ul style="list-style-type: none"> • Methoden zur Druckstossprävention
	<ul style="list-style-type: none"> • RAMS-management • Präventiver Unterhalt • Verhalten alter mit neuen Anlagenteilen kombiniert 	
Auswirkungen des Klimawandels	<ul style="list-style-type: none"> • Änderung der Produktion und des zeitlichen Verlaufs bei Laufwasser- und Speicherkraftwerken • Langfristige Anpassung der Betriebsweise von Speicherkraftwerken • Bauliche Massnahmen zur Sicherung im Umfeld der Gletscher • Einfluss von Gletscherrückgang auf vorhandene Staubecken 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfluss des Klimawandels auf die Jahresproduktion

Potenzial- abschätzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Konzessionserneuerungen und Ausbaupotentiale: Vergleich von Leistungssteigerung und Produktionseinbussen infolge GSchG 	<ul style="list-style-type: none"> • Energienutzungspotenziale bei Wasserversorgungen • Einzugsgebietsbezogene Potentialabschätzungen • Abschätzung des Anteils real nutzbarer Potentiale am Gesamtpotential
Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Bessere Vermarktung von Ökostrom • Neubewertung externer Effekte [16] 	<ul style="list-style-type: none"> • Risikobeurteilung und Finanzierungsmodelle
Talsperren	<ul style="list-style-type: none"> • Stauraumentlandung und Geschlebedurchleitung • Schwall/Sunk Problematik • Abdichtungsmassnahmen und Alkaliaggregatreaktionen 	
Gewässerökologie	<ul style="list-style-type: none"> • Situationsangepasste Restwasserregelungen • Fischabstiegseinrichtungen, Fischabweisanlagen • Fischfreundliche Turbinen • Entsorgung von natürlichem Schwemmgut • Schwall/Sunk Problematik 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Integrative Untersuchungen zum Spannungsfeld grösstmögliche Wassernutzung vs. Umwelt 	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinwasserkraftwerke, die einen ökologischen Nutzen bringen beziehungsweise keinen Schaden verursachen
Wasserkraft im Netzbetrieb: Regelfragen und Wirtschaftlichkeitsaspekte	<ul style="list-style-type: none"> • Regeleinsatz der Wasserkraft • Hoheit über Betriebssteuerung • Bepreisungsmethodik für Systemdienstleistungen • Einsatz der Wasserkraft im liberalisierten Markt • Wasserkraft als Ergänzung der dezentralen Energieversorgung • Abfangen von Lastspitzen (bei gleichzeitiger Schwall/Sunk Problematik) • Besseres Energiemanagement zur besseren Ausnutzung der Pumpspeicherkapazität und überschüssiger Bandenergie 	
Bereich Forschungsinfrastruktur	<p>Für viele der obengenannten Forschungsthemen sind interdisziplinäre Netzwerke erforderlich, die zudem international vernetzt sein sollten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aufbau von Forschungsinfrastrukturnetzwerken • Unterstützung internationaler Kooperation • Informationstransfer und Marktüberleitung • Stärkung der Grundlagenforschung, um Nachwuchs zu fördern 	
Politische Fragestellungen	<ul style="list-style-type: none"> • Straffung von Genehmigungsverfahren 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserzinsen (Anregung der Betreiber) 	<ul style="list-style-type: none"> • Vereinfachung der Konzessionserneuerung bei Kleinkraftwerken (ehemalige Wasserrechte sind sehr hinderlich) • Beseitigung kantonaler Unterschiede für Kleinstkraftwerke
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> • Synergien, Mehrzweckprojekte 	
		<ul style="list-style-type: none"> • Best Practice Guidelines

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer)

- [1] Karl Randall (karlrandall@gresham.ch), Gresham Sàrl, Genève: **Floating Turbine UEK Swiss Project – Feasibility Study** (SB Projekt 101'482)
- [2] Thomas Staubli (tstaubli@hta.fhz.ch), HTA Luzern, Luzern: **Optimierung von Kleinwasserkraftwerken durch Qualitätssicherung – Vorprojekt** (SB Projekt 101'488)
- [3] J-M Chappalaz (jmceng@bluewin.ch), JMC, Baulmes: **Pumpen als Turbine mit verstellbarem Leitapparat (PAT-Francis)** (SB Projekt 101'867)
- [4] Vincent Denis (info@mhyllab.com), MHyLab, Montcherand: **Turbines Diagonales 06** (JB Projekt 101915)
- [5] Bruno Schindelholz (bruno.schindelholz@revita.ch), Stiftung revita, Langenbruck: **Universell einsetzbare Turbine für Wasserversorgungen** (JB Projekt 102'033)
- [6] Hanspeter Leutwiler (iskb@iskb.ch), ISKB, Affoltern a. Albis: **Kosten und Energiezuwachs Kleinwasserkraftwerke** (SB Projekt 102'252)
- [7] Thomas Staubli (tstaubli@hta.fhz.ch), HTA Luzern, Luzern: **Optimierung von Kleinwasserkraftwerken durch Qualitätssicherung – Folgeprojekt** (Projekt 102'390)
- [8] Ivo Scherrer (ivo.scherrer@entegra.ch), Gattstrom Buchholz AG, St. Gallen: **Monitoring der Fischschleuse des KW Buchholz** (Projekt 102'418)

Liste der P+D-Projekte

- [9] Alois Spichtig (alois.spichtig@bluemail.ch), Wasserversorgung Sachseln Dorf und Umkreis (WVS): **Trinkwasserkraftwerk Mettental** (SB Projekt 100'410)

Referenzen

- [10] Manuel Buser, Hedi Feibel, Entec AG, St. Gallen: **Forschungsprogramm Kleinwasserkraftwerke 2004-2007**
- [11] Manuel Buser, Martin Bölli, Entec AG, St. Gallen: **Jahresplan Programm Kleinwasserkraftwerke 2007**, Version 1.1, Februar 2007, zu Handen BFE
- [12] Martin Bölli, Entec AG, St. Gallen: **Jahresbericht Programm Kleinwasserkraftwerke 2007**, zu Handen BFE
- [13] UVEK, Programmleitung EnergieSchweiz, BFE (Herausgeber): **6. Jahresbericht EnergieSchweiz 2006 / 2007**, Download: <http://www.energie-schweiz.ch/>
- [14] BFE: **Positionspapier Energie aus Kleinwasserkraftwerken: Ziele und Prioritäten für die Nutzung von Energie aus Kleinwasserkraftwerken**, Version 1.2, Dezember 2004, Download: <http://www.kleinwasserkraft.ch/web/deutsch/programm/>
- [15] Klaus Jorde, Entec AG, St. Gallen: **Forschungsprogramm Wasserkraft 2008–2011 – Schlussbericht zur Entwicklung eines Forschungsprogramms im Auftrag des BFE**, Oktober 2007
- [16] B. Kohler: **Bewertung externer Effekte bei der Laufwasserkraftnutzung**, WASSERWIRTSCHAFT 97, Nr.9, 2007, S. 26–30

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

PROGRAMM GEOTHERMIE

Rudolf Minder

rudolf.minder@bluewin.ch



Bohrgerät TERRA-DRILL 4407 V im Einsatz

Das Bild zeigt den probeweisen Einsatz des ersten Prototyps eines neuen, besonders kleinen und leichten Vertikal-Bohrgeräts für Erdwärmesonden bis zu 100 m Tiefe (Bild: Terra AG).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im Jahr 2007 haben sich gegenüber dem Vorjahr keine wesentlichen Verschiebungen in den Schwerpunkten und Zielen ergeben.

Bei der **untiefen Geothermie**, insbesondere den Erdwärmesonden konnte im Jahr 2007 ein weiterhin starkes Marktwachstum festgestellt werden, stimuliert durch die hohen Preise fossiler Brennstoffe. Der Forschungsbedarf bei den Erdwärmesondensystemen beschränkt sich auf spezielle Untersuchungen, beispielsweise an kombinierten Systemen zur Heizung und Kühlung. Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht auch bei der Bohrtechnik, wo Verfahren zur kostengünstigen und raschen Erstellung von Bohrlöchern beschränkter Tiefe die Wirtschaftlichkeit der Anlagen verbessern können.

Bei den **hydrothermalen Quellen** sind die möglichen Standortgebiete gegenüber den Erdwärmesonden wesentlich eingeschränkter. Hier besteht einerseits ein Bedürfnis nach vertieften Untersuchungen in Gebieten mit bekannten oder vermuteten Aquiferen und andererseits ein grosses Interesse an der Realisierung von Pilotanlagen mit

begleitenden Forschungsarbeiten. Die Nutzung relativ tiefer Aquifere mit Wassertemperaturen von 100–130 °C stellt mittelfristig die einzige Möglichkeit dar, Elektrizität aus geothermischen Ressourcen in der Schweiz zu erzeugen.

Langfristig liegt das grösste Potential zur Stromerzeugung in der Schweiz bei der **tiefen Geothermie**, den *Enhanced Geothermal Systems* (EGS). Sowohl die Erfahrungen mit dem derzeit sistierten Pilotprojekt *Deep Heat Mining* in Basel als auch mit ausländischen Projekten dieser Art zeigen, dass bei diesem Verfahren auch längerfristig noch ein grosser Forschungsbedarf besteht, welcher sowohl anwendungsorientierte als auch Grundlagenforschung umfasst. Die heutigen Kenntnisse der bei der Erzeugung eines mehrere 1000 m tief liegenden Reservoirs ablaufenden Prozesse sind für die Realisierung von Pilotanlagen noch ungenügend. Ein für die dichtbesiedelte Schweiz besonders wichtiger Aspekt ist die Frage der durch die Reservoirstimulation induzierten Seismizität. Im Gebiet der tiefen Geothermie ist – wegen des grossen Aufwands – die internationale Zusammenarbeit besonders wichtig und sinnvoll.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

ALLGEMEINE ARBEITEN

Programme général de développement de la géothermie PROGEOTHERM [1]: Die Wärmegewinnung durch stimulierte geothermische Systeme (EGS) und ihre Umwandlung in Strom ist viel versprechend, hat aber ihre technische und wirtschaftliche Reife noch nicht erreicht. Bis heute fehlen die wissenschaftlichen Grundlagen, um die Technologie wirklich anwenden zu können. Ebenso mangelt es an wissenschaftlichem Personal, da es noch keine komplette Ausbildung in Geothermie gibt. Die bescheidenen Mittel, die für Forschung und Pilotanlagen zur Verfügung stehen begrenzen das Engagement des Privatsektors. Zudem steht das geologische Risiko hohen Investitionen im Wege.

Wegen den oben aufgeführten Gründen und entsprechend der aktuellen Lage der Energiepolitik ist ein nationales Programm für die Entwicklung der Geothermie in der Schweiz skizziert worden. Dieses Programm, PROGEOTHERM genannt, besteht aus drei Bereichen:

- Ausbildung: Errichtung eines Master of Advanced Studies (MAS) in Geothermie an der Universität Neuenburg; Unterstützung der Weiterbildungskurse an den Fachhochschulen (FH).
- Forschung & Entwicklung: Arbeiten an F+E-Vorhaben in den verschiedenen Anwendungsbereichen der Geothermie.

- Pilot- und Demonstrationsanlagen: Wegbereitung und Projektunterstützung bei grossen Geothermieanlagen; Bereitstellen von neuen Geräten und Erkundungsmethoden.

PROGEOTHERM wird die Möglichkeiten der geothermischen Energienutzung in der Schweiz erheblich verbessern. Es ist 2008 noch den finanziellen Möglichkeiten anzupassen und kann dann gestartet werden.

UNTIEFE GEOTHERMIE

Manuel pour le refroidissement de bâtiments par «gé-cooling» sur sondes géothermiques verticales: critères d'intégration, potentiel de refroidissement et règles simplifiées de dimensionnement [2]: Le projet de recherche « Rafrâchissement par *geocooling* : bases pour un manuel de dimensionnement » a mis en évidence le manque des connaissances actuelles relatives à l'intégration de ce genre de système dans un bâtiment et de son interaction avec ce dernier, et par voie de conséquence sur le potentiel d'utilisation de ce type de système. L'objectif principal du présent projet est de combler ces lacunes et de rédiger un manuel sur la thématique. Il s'agit de :

- analyser les critères d'intégration dans un bâtiment d'un système de *geocooling* utilisant des sondes géothermiques verticales, et

étudier les synergies possibles avec d'autres systèmes de rafraîchissement ;

- évaluer le potentiel de refroidissement en relation avec le bâtiment et la distribution de froid (type de bâtiment, destination, taille, protections solaires, gains internes à évacuer, type de distribution de refroidissement) ;
- analyse de sensibilité en fonction des principaux paramètres d'intégration (« qualité » du bâtiment et de la distribution de rafraîchissement, importance des gains internes et des gains solaires) ;
- analyse de sensibilité en fonction des principaux paramètres de dimensionnement (paramètres géologiques, température du terrain, longueur et configuration des sondes géothermiques) ;
- établissement de règles de prédimensionnement pour des bâtiments à basse consommation énergétique.

Ce projet se déroule en étroite collaboration avec le Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE) pour profiter des synergies et des méthodes développées dans un projet similaire mais appliqué à la technique des puits canadiens. Une séance de travail au CUEPE a eu lieu pour coordonner la première phase du travail. L'essentiel du travail sera effectué durant les années 2008 et 2009.

Étude du potentiel d'utilisation du «géoo-cooling» d'une installation avec sondes géothermiques verticales appliqué à un bâtiment administratif Minergie® à Chiasso [3]: Le nouveau bâtiment de la douane commerciale de Chiasso - Brogeda est un bâtiment administratif de 2'200 m² de surface de référence énergétique répartis sur 6 étages. Construit de manière à respecter le standard Minergie® avec une distribution de chaleur et de froid par dalles actives, il possède de bonnes caractéristiques pour une intégration optimale d'un système de chauffage et de refroidissement par un champ de sondes géothermiques.

Le projet a pris du temps pour se mettre en marche avec une phase laborieuse de calibration du modèle en phase avec la première année de fonctionnement du bâtiment. La prochaine étape est celle de coupler le modèle de bâtiment au modèle du système de chauffage et de refroidissement pour étudier la faisabilité technique du système, établir le dimensionnement (pompe à chaleur et champ de sonde) et évaluer le potentiel de «geoo-cooling» offert par les sondes géothermiques. Le projet se terminera avec une analyse du confort thermique dans le bâtiment pour diverses variantes et l'établissement de recommandations et de règles du pouce pour le pré-dimensionnement d'un système analogue. Des résultats concrets

ne sont pas encore disponibles; le projet sera terminé à la fin de l'année 2008.

Thermal Response Tests: Assessment and Validation [4]: The objectives of the project are to develop, to test and to propagate new and innovative methods for the performance and analysis of thermal response tests (TRT). TRT are used to investigate thermophysical properties of the ground (particularly the thermal conductivity) for the purpose of dimensioning borehole heat exchangers. The project was started in May 2006. In the first period (phase I) the following tasks have been solved:

- Review of the international state-of-the-art on thermal response testing;
- Assessment of the requirements, potential and limits of applications of the mini-module (EPFL) for the evaluation of thermophysical parameters;
- Assessment of the requirements, potential and application limits of the wireless temperature logger NIMO-T (*Geowatt*) for the evaluation of the lateral variation in thermophysical parameters (analogous to hydraulic fluid-logging). Assessment of coupling TRT data with mini data logger data with finite elements (FE) modeling using generic data;
- Evaluation of methods of hydraulic and thermophysical testing applied to actual cases (*Colenco*).

In the actual phase of the project the method will be applied to real test sites and it is expected that optimized procedures in terms of time, cost and results will be developed.

Erfahrungsbericht Heizen/Kühlen mit Erdwärmekörben [5]: Erdwärmekörbe (Figur 1) bilden eine Alternative zu Erdwärmesonden (EWS) mit geringer Leistung. Sie können auch mit EWS kombiniert werden, um mit vertretbarem Aufwand eine Leistungssteigerung zu erzielen. Insbesondere für Niedrigenergie-Bauten bilden sie oft die kostengünstigste Lösung. Für die Auslegung sind lokale Verhältnisse und die Art der Energienutzung wesentliche Faktoren. Anhand von konkreten Beispielen wird aufgezeigt, welche Auswirkung Überlastungen und schlechte Böden haben können. Um die Betriebsweise besser verstehen zu können, wurden eine EFH-Anlage (Erdwärmekörbe-Wärmepumpe Heizen und Kühlen), 2 sanierte Anlagen und eine MFH-Anlage mit einem *Data-logger* versehen (Korbtemperatur, Wärmepumpe ein/aus, Heizsystem). Diese Anlagen werden seit Mitte 2007 während 1.5 Jahren ausgemessen und analysiert. Die Resultate werden so aufbereitet, dass in Zukunft Schäden durch falsche Dimensionierung und andere Einflüsse vermieden werden können.



Figur 1: Erdwärmekorb vor der Verfüllung (oberer Durchmesser ca. 150 cm).

EWSDruck: Aufdatierung eines Excel-Tools zur Auslegung von Erdwärmesonden [6]: Das Projekt beinhaltet eine Überarbeitung und Weiterentwicklung der Software «EWSDruck», die im Rahmen des früheren BFE-Forschungsprojektes «Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen» entwickelt wurde (Huber, Projektnummer 19'227). Die Motivation des Forschungsprojektes war, dass in Erdwärmesonden-Wärmepumpen-Anlagen teilweise bis zu 20% der elektrischen Energie für die Sondenpumpe benötigt wird. Bei einer Optimierung des Sondenkreislaufs lässt sich dieser Wert in der Regel auf unter 10% reduzieren. Die Software berücksichtigt für die Druckverlustberechnung nebst dem Druckabfall in der Erdsonde auch diejenigen über dem Verdampfer der Wärmepumpe, des Sondenverteilers, der Zuleitungen sowie weiterer wählbarer Komponenten. Das Projekt wurde 2007 erfolgreich abgeschlossen.

Thermische Leitfähigkeit: Eichung von in-situ Messungen (d.h. «kabellose Temperatursonde») mit Laborbestimmungen als Grundlage für die geothermische Kartierung des Kantons ZH bzw. der umliegenden Kantone [7]: Ziel der Untersuchung ist das Bereitstellen der Grundlagen wie Untergrundtemperaturen, Wärmeleitfähigkeit und Porosität der Gesteine sowie Wärmeflussberechnungen zur geothermischen Kartierung im Kanton Zürich und den angrenzenden Gebieten der Kantone AG, SZ und SG. Mit einer von den Autoren entwickelten und bereits patentierten kabellosen Temperaturmesssonde, genannt NIMO-T (Figur 2) wurden in Erdwärmesonden der Temperaturverlauf des Untergrundes bis rund 300 m Tiefe gemessen. Solche Messungen sind möglich, wenn die Sonden hinterfüllt, noch nicht an die Wärmepumpe angeschlossen sind und das Wasser in den

Sondenrohren während mindestens 7 Tagen nicht bewegt wird. Insgesamt wurden in 33 Bohrungen Temperaturmessungen gemacht, davon in 24 auch Wärmeflussbestimmungen. In 6 von 24 untersuchten Bohrungen lässt sich das aus den gemessenen Temperaturlogs und dem berechneten lokalen Wärmefluss abgeleitete Wärmeleitfähigkeits-Tiefenprofil kalibrieren. Die Abweichungen zwischen den abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten und denjenigen an Bohrproben gemessenen sind nicht systematisch und betragen in etwa $\pm 5\%$. Es gab keine Vorkommnisse, die einer Weiterverwendung der Ergebnisse entgegenstehen. Die erzielten Resultate sind ein wesentlicher Beitrag für die Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen, und für die geothermische Detailkartierung; darüber hinaus liefern sie Basisdaten für die Paläoklimaforschung der letzten Jahrhunderte.



Figur 2: Prototyp der Sonde NIMO-T. 1: Sondenkopf mit Messfühler und O-Dichtungsringen; 2: abziehbares Druckgehäuse; 3: Datenlogger; 4: Stecker für Batterie und Datentransfer-Kabel.

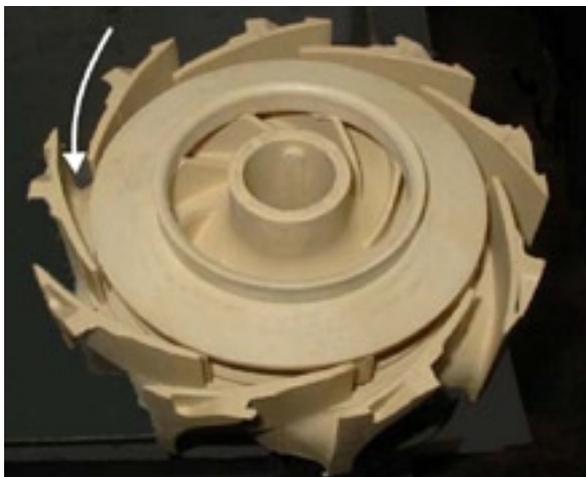
Entwicklung eines Vertikal-Bohrgeräts [8]: Das Projekt hat zum Ziel, ein kleines und leichtes Bohrsystem zu entwickeln, welches sich für den EWS-Anlagenbau im Wohnbereich eignet. Insbesondere EWS-Anlagen für Minergie-Bauten sollen damit rasch und kostengünstig realisiert werden können. Wegen seinen kleinen Abmessungen und der geringen Lärmentwicklung lässt sich das Bohrgerät auch in dicht überbauten und schwer zugänglichen Zonen einsetzen (vgl. Titelbild des Berichts). Dies ist von besonderem Interesse im Sanierungsmarkt. Die Erfahrungen mit einer ersten Prototypanlage sind sehr positiv. Das Ziel, eine Bohrtiefe von 75 m zu erreichen wurde deutlich übertroffen, je nach Bodentyp kann mit 80 bis 100 m Maximaltiefe gerechnet werden. Bis zum Projektabschluss im Sommer 2008 soll ein zweiter Prototyp gebaut werden bei welchem die bisher gemachten Erfahrungen einfließen werden.

GRUNDWASSERNUTZUNG

Erfolgskontrolle Grundwasser-Rückgabe-Turbinierung [9]: Zur Effizienzsteigerung der Grundwasser-Wärmepumpenanlage in einem Bürogebäude wurde der Rückgabebrunnen mit einer Turbine versehen. Da das Grundwasser bei dieser Anlage aus einer Tiefe von 45 m ge-

fördert werden muss, verbraucht man viel Strom für die Förderung. Die installierte Turbine ist eine normale Unterwasserpumpe, aus welcher man 3 Laufräder entfernte (Figur 3). Die Effizienz der Anlage konnte so in einem ersten Schritt um 6% gesteigert werden. Die Jahresarbeitszahl (JAZ) der Anlage beträgt ohne Turbineneinsatz 3.4 und mit Turbine 3.6. Im Hinblick auf den Anschluss weiterer Liegenschaften wurde die Anlage überdimensioniert und läuft somit zur Zeit noch nicht optimal. Wenn alle Liegenschaften an die Wärmepumpe angeschlossen sind, kann eine Effizienzsteigerung der Anlage von 16% und eine JAZ von 3.9 erwartet werden. Die für den Turbineneinsatz entstandenen Mehrkosten sind damit in rund 12 Jahren amortisiert.

Unter Berücksichtigung, dass für die Stromrückgewinnung keine auf die vorliegenden Gegebenheiten ausgerichtete Spezialanfertigung, sondern eine normale Unterwasserpumpe verwendet wurde, sind dies ermutigende Ergebnisse. Im Hinblick auf die vielerorts in grosser Tiefe liegenden Aquifere, welche sich aufgrund ihrer hohen Mineralisierung nicht für eine Verwendung als Trinkwasser eignen, wäre die Entwicklung einer speziell auf solche Situationen entwickelte Turbine im Sinne der Verringerung des Stromverbrauchs sinnvoll.



Figur 3: Das Schaufelrad der Rücklaufturbine.

TIEFE GEOTHERMIE

AGEPP – Alpine Geothermal Power Plant [10]: Ziel des Projektes ist die gekoppelte Strom- und Wärmeproduktion aus tiefliegenden Aquifere in den Alpen. Als hierfür besonders geeignet werden tiefe Strukturen im Rhönetal (Kantone Waadt und Wallis) betrachtet. Die Standorte Brigerbad (VS) und Lavey (VD) zeigen bereits heute ergiebige Quellschüttungen und erhöhte Temperaturgradienten. In Lavey wurde eine Reservoirstruktur identifiziert, welche in ~3 km Tiefe liegt. Als Reservoirbedingungen können mindestens 110 °C

bei möglichen Förderraten zwischen 50-75 L/s angenommen werden (Figur 4). Variantenstudien zeigen mögliche Nettoleistungen von 1.1 MWe (Singlet) und 1.3 MWe (Dublettensysteme) auf. Stromgestehungskosten von 8 Rp/kWhe (Singletsystem, minimale Fließrate) bis 27 Rp/kWhe (Dublettensystem, maximale Fließrate) werden gerechnet. In den Parameterstudien zeigt sich, dass die zur Verfügung stehende Wärmemenge beträchtlich ist und 4-15 MWth erreichen kann. Bei einem Wärmeverkaufspreis von 8 Rp/kWth und einem Transportpreis von max. 3 Rp/kWth wurden verschiedene Szenarien gerechnet. Je nach Nutzung können Transportdistanzen bis zu 5 km ökonomisch sinnvoll geplant werden.

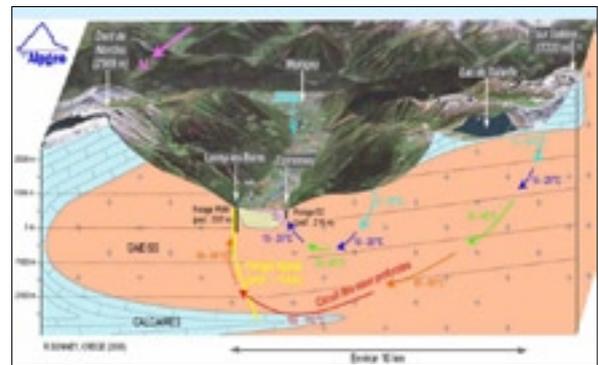


Figure 4 : Schéma hydrogéologique des circulations d'eau profonde dans la région de Lavey et St-Maurice.



Figure 5 : Carte des sites hydrothermaux répertoriés dans la base de données BDFGeotherm.

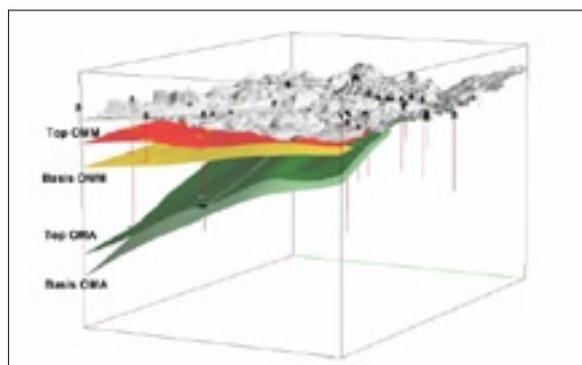
Geo-Dampf Perlen: Expertisen zur Anwendbarkeit des GEOHIL-Verfahrens in grosser Tiefe [11]: Das Konzept des Projekts besteht darin, das aus dem oberflächen-nahen Bereich bekannte GEOHIL-Verfahren auch für die Erschließung tiefliegender geothermischer Ressourcen anzuwenden. Mittels einer Tiefenbohrung von rund 7'500 m soll der Prozessdampf für die Papierfabrik *Perlen* erzeugt werden. Im Rahmen der gegenwärtig laufenden Konzeptstudie sollen einerseits die geologische Situation untersucht und andererseits Fragen zur Bohrtechnik abgeklärt werden.

Base de données des fluides géothermiques de la Suisse [12]: La base de données des fluides géothermiques de la Suisse (BDFGeotherm) a été réalisée entre octobre 2006 et février 2007. Lors de la deuxième phase du projet (mars – novembre 2007), cette base a été complétée, puis testée par quelques utilisateurs potentiels. Mise au point sous ACCESS de Microsoft, la création de la base de données BDFGeotherm a pour but de mettre à disposition l'ensemble des connaissances sur les eaux souterraines d'origine profonde possédant un potentiel géothermique. Les chefs de projets, les chercheurs, les ingénieurs et toutes les personnes voulant connaître les propriétés des fluides géothermiques d'un site ou d'une région donnée peuvent être intéressés à rechercher ce type d'informations, généralement dispersées, peu accessibles et souvent non publiées.

Au total, 203 sources, forages, galeries, tunnels et piézomètres répartis dans 82 sites hydrothermaux ont été répertoriés dans BDFGeotherm (Figure 5). Les sites localisés en Suisse se concentrent surtout dans la partie nord de l'arc jurassien et dans la vallée supérieure du Rhône (Valais). Certains sites se trouvent dans des régions limitrophes de la Suisse et ont été sélectionnés en raison de leur potentiel géothermique élevé ou de leur similarité géologique avec d'autres secteurs sur territoire suisse. Enfin, il est possible de réaliser des requêtes et d'enregistrer les résultats obtenus en utilisant les différents champs des tables de la base de données.

Geothermische Ressourcen, Erarbeitung und Bewertung des geothermischen Potentials der Schweiz, Phase 2007 [13]: Das Projekt «Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz» beschreibt das Vorgehen für 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 (vgl. Figur 6). Resultate liegen nun für eines der am dichtesten bevölkerten Gebiete der Schweiz vor: Die Nordschweiz vom Bodensee bis Solothurn. Die gewählte Vorgehensweise berücksichtigt ein bestimmtes Nutzungsszenario und basiert auf verschiedenen 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 beinhaltet umfassende geologische und thermische Modelle. Damit konnten Temperaturdaten aus über 20 Bohrungen in der Nordschweiz sehr gut wiedergegeben werden. 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 dargestellt. Als eine geothermisch vielversprechende Zone wurde dabei der oberste Teil des Kristallin identifiziert, mit maximalen Entzugsleistungen für Dublettensysteme von $>100 \text{ MW}_{\text{th}}$.



Figur 6: Darstellung der interpolierten geologischen Flächen für Top und Basis der Oberen Meeresmolasse (OMM) und des Oberen Malm (OMA). Das Modell umfasst ein $40\text{km} \times 60\text{km}$ grosses Gebiet.

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, CREGE, www.crege.ch, 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, Verband Fernwärme Schweiz (VFS).
- **Bundesämter, Agenturen und Fachverbände:** Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz (AEE, APES), Aktion für vernünftige Energiepolitik Schweiz (AVES), BAFU, SBF, Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS), energie-cluster, u.a.
- **Energiefachstellen der Kantone**

Internationale Zusammenarbeit

Geothermal Implementing Agreement (GIA) der IEA [14]: Mit der Präsenz im *Geothermal Implementing Agreement* (GIA) der IEA kann die Schweiz regelmässigen Kontakt mit führenden Geothermie-Ländern pflegen, was den Weg zu ansonsten unzugänglichen Informationen öffnet. Zugleich lassen sich Schweizer F&E-Resultate international positionieren und durch die Kanäle der IEA verbreiten. Die Arbeiten für das IEA GIA wurden 2007 durch Prof. L. Rybach ausgeführt. Er ist *Vice Chairman* des *Executive Committee*; somit ist die Mitwirkung der Schweiz an allen Entscheidungen garantiert. Ergänzendes Mitglied des GIA ExCo ist Dr. Rudolf Minder. Die Arbeiten laufen programmgemäss, die Resultate sind auf der IEA GIA Homepage abrufbar. Der Bericht über die vergangene 4-Jahresperiode ist in [18] aufgeführt.

EGS Pilot Plant. European Geothermal Project for the Construction of a Scientific Pilot Plant based on enhanced Geothermal System, Soultz-sous-Forêts, France [15]: The current phase of the European geothermal project at Soultz-sous-Forêts, entitled «EGS Pilot Plant», started in April 2004 for a period of three years. It is managed by an industrial consortium (EEIG Heat Mining) and nine scientific partners from France, Germany, Norway and Switzerland are taking part. The Deep Heat Mining Association (DHMA, Partner 6) is team leader of the Swiss EGS R&D Group and coordinator of the Work Package 5 (Methodology for stimulation of EGS).

Delays in the realization schedule of the different tasks obliged the EEIG to organize an extension

of the current project phase. Instead of finishing in March 2007, the current phase has been officially prolonged until September 2008. Most of the project effort at Soultz in 2007 was spent for preparing the future energy extraction loop and planning the production tests. A new vertical seismic profiling operation for visualizing the major underground structures has been carried out. In collaboration with a BRGM team, a multi-scale analysis of natural fracturing in the reservoir rocks was realized. Another task consisted in the calculations of productivity and injectivity indexes from production tests realised in wells GPK3 and GPK4 after the operations of several chemical stimulations. The main work of the CHYN-CREGE team was the modification of the geometric model of FRACHEM, in order to observe the effect of different fracture sizes on the evolution of the fluid chemistry.

Mit verschiedenen weiteren **internationalen Institutionen** fanden im Berichtsjahr Kontakte statt, u.a. mit **Geothermal Association of Ireland**, Dublin (Vortrag von R. Minder am 3.10. 2007), **GT-Skills**, Dublin, **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).

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS-Feld Hotel Dolder Zürich [16]: Das 5-Sterne *Dolder Grand Hotel* in Zürich, hat nach einem umfassenden Umbau 2007 den Betrieb wieder aufgenommen. Der Um- und Erweiterungsbau wurde mit einer komplett neuen Haustechnik ausgerüstet mit dem Ziel, den Energieverbrauch zu halbieren, obwohl die Energiebezugsfläche auf 40'000 m² mehr als verdoppelt wird. Bisher benötigte der gesamte Betrieb jährlich 300'000 Liter Heizöl und über 3 GWh Elektrizität. Mit einer stark gedämmten Gebäudehülle sollen die Heizkosten um 75 Prozent und der Stromverbrauch um 25 Prozent sinken. 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 Untergrund gewonnen wird. Die Bohr- und Installationsarbeiten für die Erdwärmesonden wurden im Frühjahr 2005 abgeschlossen. Das geothermische Verhalten wurde mittels einem *Thermal Response Test* untersucht, um damit die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes zu bestimmen. Die Anlage ist mit einer umfangreichen Messeinrich-

tung ausgerüstet, welche es erlauben wird, das Systemverhalten detailliert zu untersuchen.

Mesures et optimisation de l'installation avec pieux énergétiques du Dock Midfield de l'aéroport de Zurich [17]: Avec une longueur de 500 m sur une largeur de 30 m, le *Dock Midfield* a été construit sur 440 pieux de fondation dont plus de 300 sont utilisés en pieux énergétiques. Le bilan énergétique du système, et en particulier les demandes d'énergie annuelles de chauffage et de refroidissement sont proches des valeurs établies durant la phase de planification. D'autre part, les performances thermiques du système sont très bonnes. Ceci confirme la nécessité d'une planification détaillée et soigneuse. Les mesures d'octobre 2005 à septembre 2006 ont montré que la pompe à chaleur (PAC), contribue pour plus de 70% au chauffage du bâtiment (3'020 MWh/an), le reste étant couvert par du chauffage à distance. La demande de refroidissement est couverte par *geocooling* (53%), en satisfaisant des besoins de chauffage simultanés (32%) et avec la PAC utilisée comme machine frigorifique (15%). La pro-

duction de *geocooling* représente 40% de l'énergie extraite en hiver par la PAC. Elle assure ainsi une recharge thermique suffisante du terrain, indispensable pour garantir un fonctionnement à long terme du système. Rapportées par mètre linéaire de pieu, la puissance moyenne et l'énergie annuelle extraite ont été établies à respectivement 45 W/m et 183 kWh/(m an). Pour le *geocooling*, ces valeurs sont de 16 W/m et 74 kWh/(m an). Le coefficient de performance annuel de la PAC est mesuré à 3.9. L'efficacité annuelle de *geocooling* est exceptionnellement élevée avec une valeur de 60. L'efficacité globale annuelle du système est de 5.1. Le bilan de la 2^{ème} année de mesure est montré dans la figure 7. Le coût de l'énergie thermique délivrée (en chaud et en froid) est calculé à 6 ct/kWh, que l'on peut comparer à celui de 8 ct/kWh pour une solution conventionnelle. L'in-

vestissement supplémentaire du système avec pieux est remboursé en plus ou moins 8 ans. Le projet a été terminé en 2007.

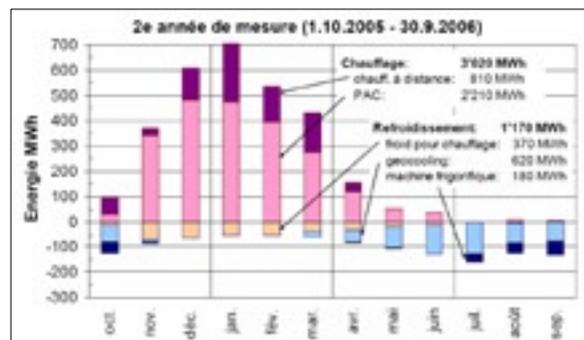


Figure 7 : Bilan des énergies mensuelles dans la 2^{ème} année de mesure.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Das Jahr 2007 kann durch eine **Kontinuität in der geothermischen Forschung** charakterisiert werden. Bei der **untiefen Geothermie** wurden weiterhin Arbeiten gefördert, welche mithelfen sollen, die Qualität der Anlagen in einem boomenden Marktumfeld zu gewährleisten, sowie Projekte, welche sich mit speziellen Anwendungen befassen. Die steigende Nachfrage nach Erdwärmesonden-Anlagen im Bereich Niedrigenergie-Gebäude führt zu neuen Fragestellungen z.B. bezüglich des Einsatzes von Erdwärmekörpern oder leichten Bohrgeräten, mit welchen auch bei engen Platzverhältnissen Erdwärmesonden mit begrenzter Länge realisiert werden können.

Bei den **hydrothermalen Ressourcen** konnten neben grundlegenden Untersuchungen vielversprechende Planungsarbeiten in Zusammenhang mit dem Standort Lavey-les-Bains durchgeführt werden. Dieses in der Region breit abgestützte Projekt für geothermische Strom- und Wärmeproduktion bietet ein günstiges Umfeld für die mittelfristige Realisierung einer ersten Pilotanlage dieser Art.

Bei der **tiefen Geothermie** bilden weiterhin die «*Enhanced Geothermal Systems*» (EGS) einen Forschungsschwerpunkt. Das europäische Forschungsprojekt in Soultz-sous-Forêts stand dabei im Zentrum dieser Aktivitäten. Die bei der Stimulation der ersten Tiefbohrung in Basel aufgetretenen seismischen Ereignisse werden von der Projektgesellschaft wissenschaftlich ausgewertet und erste Erkenntnisse wurden z.B. an der Europäischen Geothermie-Konferenz EGC 2007 [19],

sowie auch in Form eines Übersichtsberichts [20] publiziert. Das Thema der induzierten Seismizität ist heute auch auf internationalem Niveau sehr aktuell [21, 22] und wird die Forschung noch während längerer Zeit intensiv beschäftigen. Obwohl die Ereignisse in Basel die Hoffnungen auf eine rasche Umsetzung der EGS-Technik gedämpft haben, wird sie nach wie vor als interessante, wenn auch langfristige Option der CO₂-freien Stromerzeugung angesehen.

Im Berichtsjahr 2007 stand die Geothermie auch im **politischen Fokus**. Im Eidgenössischen Parlament wurde mit breiter Unterstützung eine Motion überwiesen, welche eine verstärkte Förderung der Forschung im Gebiet der tiefen Geothermie verlangt. Im Hinblick auf die dadurch zu erwartende Ausweitung der Forschung wurden Konzepte zum sinnvollen Einsatz zusätzlicher Fördermittel erarbeitet. Dies betrifft einerseits das Projekt PROGEOTHERM [1], andererseits hat die Geothermie-Dachorganisation GEOTHERMIE.CH ein Strategiepapier erarbeitet mit dem Titel «*Forschungs- und Entwicklungsprogramm zur geothermischen Stromerzeugung in der Schweiz (FEGES)*». Leider wurden die vom BFE für das Geothermie-Programm beantragten zusätzlichen Mittel für das Jahr 2008 vom Parlament nicht bewilligt, sodass die erarbeiteten Pläne vorerst nicht wie vorgesehen umgesetzt werden können. Das Forschungsprogramm Geothermie wird jedoch für das Jahr 2008 trotzdem, soweit wie es die Mittel zulassen, verstärkt.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter den angegebenen Projektnummern in Klammern).

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

- [1] F.-D. Vuataz, (francois.vuataz@unine.ch), CREGE, Neuchâtel: **Programme général de développement de la géothermie PROGEOTHERM** (SB, 102'203)
- [2] 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)
- [3] 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** (JB, 101'291)
- [4] 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)
- [5] E. Rohner, (rohner@geowatt.ch), GEOWATT AG, Zürich: **Erfahrungsbericht Heizen/Kühlen mit Erdwärmekörben** (JB, 102'141)
- [6] A. Huber, (huber@hetag.ch) HUBER ENERGIETECHNIK AG, Zürich: **EWSDruck: Aufdatierung eines Excel-Tools zur Auslegung von Erdwärmesonden** [6] (SB, 102'111)
- [7] U. Schärli, (ueli.schaerli@geophysik.ch), DR. U. SCHÄRLI GEOLOGIE + GEOPHYSIK, Zürich: **Thermische Leitfähigkeit: Eichung von in-situ Messungen mit Laborbestimmungen als Grundlage für die geothermische Kartierung des Kantons ZH bzw. der umliegenden Kantone** (SB, 101'289)
- [8] D. Jenne, (terra.dj@bluewin.ch), TERRA AG, Brittnau: **Entwicklung eines Vertikal-Bohrgeräts** (JB, 102'304)
- [9] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, Aarau: **Erfolgskontrolle GW-Rückgabe-Turbinierung** (SB, 101'012)
- [10] G. Bianchetti, (bianchetti@alpgeo.ch), ALPGEO SARL, Sierre: **Projet de géothermie profonde à Lavey-les-bains, étude de faisabilité** (JB, 102'130)
- [11] H. Hildebrand, (geohil@bluewin.ch), GEOHIL ENGINEERING AG, Walchwil: **Geo-Dampf Perlen: Expertisen zur Anwendbarkeit des GEOHIL-Verfahrens in grosser Tiefe** (JB, 102'220)
- [12] F.-D. Vuataz, (francois.vuataz@unine.ch), CREGE, Neuchâtel: **Base de données des fluides géothermiques de la Suisse (BDFGeotherm)** (JB, 101'824)
- [13] S. Signorelli, (signorelli@geowatt.ch), SCHWEIZERISCHE GEOPHYSIKALISCHE KOMMISSION (SGPK), Zürich: **Geothermische Ressourcen: Erarbeitung und Bewertung des geothermischen Potentials der Schweiz, Phase 2007** (SB, 100'022)
- [14] Th. Mégel, (megel@geowatt.ch), GEOWATT AG, Zürich: **Teilnahme am Geothermal Implementing Agreement der IEA, Fortsetzung 2007** (JB, 41'661)
- [15] 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

- [16] B. Sigg, (info@doldergrand.ch), DOLDER GRAND HOTEL, Zürich: **Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS- Feld Hotel Dolder Zürich** (JB, 100'878)
- [17] M. Hubbuch, (m.hubbuch@hswzfh.ch), ZAHW, Wädenswil, D. Pahud, SUPSI, Treveno-Canobbio: **Energiefahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen** (SB, 37'373)

Referenzen

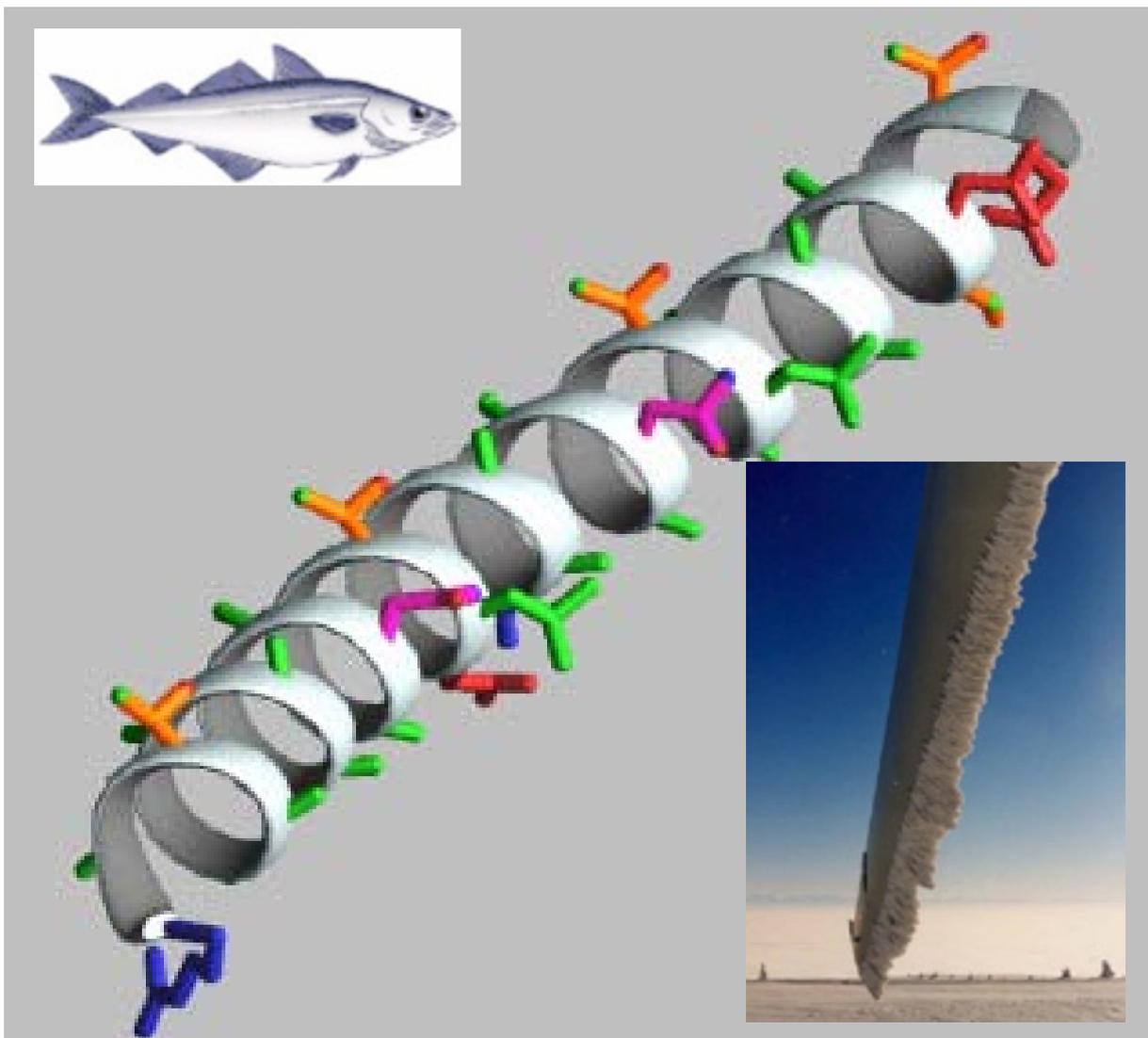
- [18] *International Energy Agency, Implementing Agreement for a Co-operative Programme on Geothermal Energy Research and Technology End-of-Term Report 2002-2007 and Plans for 2007-2012* (download: <http://www.iea-gia.org/documents/GIAEoTReport2002-2007FinalVer30October0623May07.pdf>)
- [19] Markus O. Häring (haring@geothermal.ch), Geothermal Explorers Ltd: **DEEP HEAT MINING Basel, Preliminary Results**, European Geothermal Congress EGC 2007, Unterhaching, Germany (http://www.geothermal.ch/downloads/dhm_egc300507.pdf)
- [20] Markus O. Häring (haring@geothermal.ch), Geothermal Explorers Ltd **Geothermische Stromproduktion aus Enhanced Geothermal Systems (EGS): Stand der Technik** (Bericht im Auftrag des EWZ, download: <http://www.geothermal.ch/downloads/egs061207.pdf>)
- [21] E. Majer, R. Baria, M. Stark, B. Smith, S. Oates, J. Bommer, and H. Asanuma: **Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems** (download: http://www.iea-gia.org/documents/ISWPf1MajerWebsecure20Sep06_000.doc)
- [22] S. P. Hunt, C. Morelli, **Cooper Basin HDR hazard evaluation: Predictive modeling of local stress changes due to HFR geothermal energy operations in South Australia**, The University of Adelaide, Oktober 2006

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

PROGRAMM WIND

Robert Horbaty

robert.horbaty@enco-ag.ch



Antifreeze Proteine erzeugen einen Unterschied zwischen Schmelz- und Gefrierpunkt von Wasser. An Rotorblättern von Windenergieanlagen wird untersucht, ob dieser bei arktischen Fischen festgestellte Effekt auch für die Nutzung der Windenergie im kalten Klima verwendet werden kann.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Weltweit hat sich die installierte Leistung von Windenergieanlagen zwischen Ende 1999 und Ende 2006 von 13'600 auf 74'223 MW mehr als verfünffacht. Diese Anlagen liefern jährlich ca. 156 TWh Elektrizität bei gleichzeitiger Reduktion der CO₂-Emissionen um über 116 Mio. t. Die Windenergieindustrie setzt rund 8 Mrd. Euro um, 84% davon in Europa. Ende 2006 waren in der Schweiz 31 Windkraftanlagen installiert mit einer Gesamtleistung von 11.6 MW, welche rund 15.3 GWh Strom pro Jahr erzeugen. In der Schweiz hat sich eine Zulieferindustrie entwickelt, welche international agiert und in der Schweiz jährlich ca. 170 Mio. Franken umsetzt. Die Schweizer Forschung ist international vernetzt und vor allem auf dem Gebiet von Anlagen im Gebirge und an unzugänglichen Standorten aktiv.

Die Schwerpunkte des *Energieforschungsprogramms Windenergie 2004–2007* [17, 18] waren:

- Erarbeitung von Beiträgen zur Erhöhung der Akzeptanz der Windenergienutzung;
- Entwicklung von innovativen Komponenten;
- Entwicklung von spezifischen Konzepten und Komponenten für Anlagen in schwierigem Gelände und unter rauen klimatischen Bedingungen.

Um die Umsetzung zu verbessern wurden zudem folgende Aktivitäten geplant:

- Optimierung der Leistungselektronik im MW-Bereich;
- Ausbau der Kompetenzen für die Windenergienutzung im Gebirge;
- Entwicklung von spezifischen Konzepten, z.B. für dezentrale Stromproduktion in Randregionen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

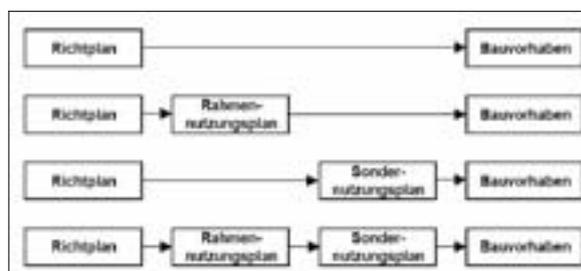
ERHÖHUNG DER AKZEPTANZ DER WINDENERGIENUTZUNG

Im Zusammenhang mit den Planungsprozessen und den Bewilligungsverfahren tauchen planungsrechtliche und planungsmethodische Fragen auf, die in den Kantonen unterschiedlich beantwortet werden (siehe Fig. 1). Die damit verbundene Unsicherheit betrifft sowohl die Behörden als auch die Ersteller von Windkraftanlagen. Bevor sich nun aus der bisher unterschiedlichen Behandlung von Baugesuchen eine Praxis konsolidiert, wird versucht, die Erfahrungen zu einem einheitlichen Vorgehen bei Planungs- und Baubewilligungsverfahren zu entwickeln.

Die Arbeit *Planerische Voraussetzungen für die Nutzung der Windenergie* [1] leistet hierzu einen Beitrag, indem – basierend auf Erfahrungen der zuständigen kantonalen Amtsstellen – Vorschläge über die zweckmässige Abwicklung der Verfahren und die jeweils in den einzelnen Planungsschritten zu behandelnden Themen erarbeitet wurden. Der Bericht präsentiert eine Auslegeordnung der Raumplanungsinstrumente und Planungsvorgehen, welche in Zusammenhang mit Windenergieanlagen in Frage kommen bzw. in den Kantonen angewendet werden (Figur 1). Es werden Empfehlungen betreffend dem Einsatz dieser Instrumente und Vorgehensweisen abgegeben, und für Ersteller und Betreiber von Windenergieanlagen wird zusammengefasst, welche Informationen zum Planungsstand betreffend Windenergieanlagen vorhanden sind. Es wird aufgezeigt, welche Unterlagen notwendig sind, um die raumplanerischen Verfahren erleichtern und beschleunigen zu können.

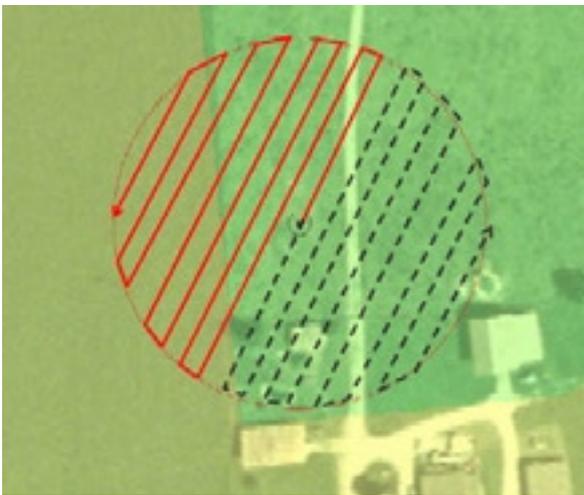
Ziel der bisherigen Arbeiten im Projekt *Auswirkung von Windkraftanlagen in der Schweiz* [2] ist die Identifizierung von projekt-, bewilligungs- und akzeptanzrelevanten Auswirkungen von Windkraftanlagen (WKA) auf die Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft sowie von wichtigen Erfolgsfaktoren realisierter Projekte in der Schweiz. Als Hauptprodukte dieses Projekts werden ein Leitfaden für Investoren und ein Musterbericht «UVB/UVV» erarbeitet. Der vorliegende Grundlagenbericht enthält die dafür nötigen Detailinformationen. Bis heute braucht es für die Erstellung einer WKA keine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP). Der Gesetzgeber beabsichtigt jedoch, eine solche einzuführen. Deshalb soll der Musterbericht eine mögliche UVP-Pflicht bereits berücksichtigen.

Im Projekt *Eoliennes en Suisse et mortalité de chauves-souris* [3] wurden die Einflüsse der



Figur 1: Das Thema Windenergie ist im kantonalen Richtplan zu behandeln, denn deren Nutzung löst raumwirksame Aufgaben aus. Die Behandlungstiefe und der Einbezug weiterer Planungsinstrumente sind vom Stellenwert, welcher der Windenergie in einem Kanton zukommt, abhängig.

Windturbinen auf Fledermäuse an verschiedenen Standorten ermittelt (Fig. 2 und 3). Die Untersuchungen zeigen, dass die Kollisionsraten von Fledermäusen an WKA im Allgemeinen gering sind. Trotzdem können an kritischen Standorten relativ viele Fledermäuse getötet werden, was zu erheblichen Auswirkungen auf lokale Fledermauspopulationen führen kann. In der Schweiz sind 30 verschiedene Fledermausarten nachgewiesen worden. Fledermäuse sind bedroht und deshalb bundesrechtlich geschützt. Nach heutigem Wissensstand werden Fledermäuse in erster Linie durch Kollisionen mit den Rotorblättern beeinträchtigt. Problematisch sind Windkraftanlagen insbesondere dann, wenn sie in der Nähe von bedrohten Kolonien, in deren Jagdlebensräumen oder in Flugkorridoren stehen.



Figur 2: Die Umgebung von einzelnen Anlagen wurde systematisch nach toten Fledermäusen abgesucht, die aufgefunden Kadaver wurden detailliert rapportiert.

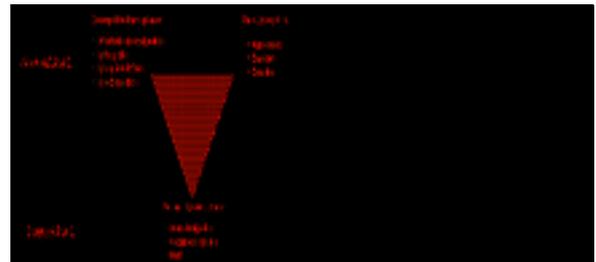


Figur 3: Eine der untersuchten Anlagen ist die 6 kW-Aventa AV7 am Standort in Tramelan.

Gemäss Studien aus der EU und den USA schwankt die Anzahl getöteter Fledermäuse pro Windkraftanlage und Jahr abhängig vom Standort und dem Betrieb zwischen 0 und 50 Tieren.

Da Fledermäuse sehr langlebig sind (sie können über 30 Jahre alt werden) und sich nur sehr langsam fortpflanzen (meist nur ein Jungtier pro Weibchen und Jahr) könnten Windturbinen langfristig bedrohte Fledermauspopulationen gefährden. Genauere Untersuchungen dazu stehen aber noch aus. Mit guter Planung und einigen Zusatzmassnahmen kann die Auswirkung der Anlagen auf Fledermäuse aber stark reduziert werden.

Die Kehrseite des weltweiten Booms der Windenergie ist, dass Projekte mehr und mehr mit Akzeptanzproblemen zu kämpfen haben – gerade auch in der Schweiz. Gespräche innerhalb des *IEA-Windenergie-Forschungsprogramms* weisen auf ein grundsätzliches Interesse am Thema «soziale Akzeptanz» hin. Im Mai 2007 wurde ein *IEA Topical Expert Meeting «Social Acceptance»* [4] in Luzern durchgeführt. Anlässlich dieses Treffens wurde das Thema unter Experten breit lanciert. Insbesondere bot der «ressortübergreifende» Erfahrungsaustausch von Sozialwissenschaftlern und Ingenieuren eine Plattform zur Erarbeitung von konkreten Strategien, wie die Branche mit Akzeptanzfragen umgehen soll (siehe Fig. 4).



Figur 4: Das «Dreieck der sozialen Akzeptanz» macht die unterschiedlichen Spannungsfelder dieses Themas in den Bereichen Politik, Markt und Gesellschaft deutlich.

Anlässlich dieses Treffens von 15 Personen aus 4 Ländern wurde angeregt, dass die Schweiz innerhalb des *IEA-Wind-Programms* die Führung zur Lancierung eines Projektes **Social Acceptance of Wind Energy** übernehmen soll. Erste Ideen dazu liegen vor und werden nun weiter konkretisiert.

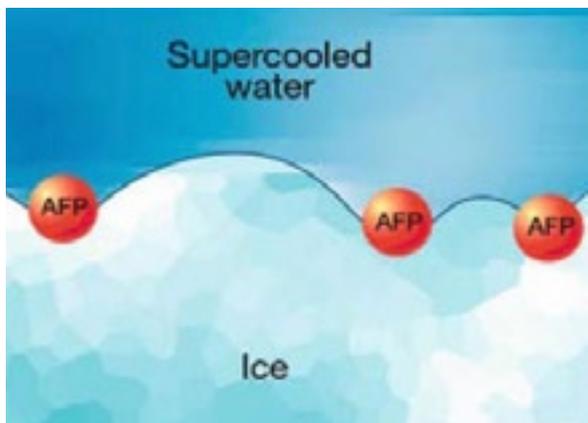
Der Schwerpunkt des Projektes **Social Acceptance of Wind Energy in Switzerland – To Invest or Not to Invest** [5], welches an der EPFL in Lausanne durchgeführt wird, ist die fundierte Analyse, wieso Investoren in der Schweiz im Bereich der Windenergie aktiv sind und – falls sie von Investitionen absehen – welche Rahmenbedingungen geändert werden müssten.

ENTWICKLUNG VON INNOVATIVEN KOMPONENTEN

Um das in Europa vorhandene Windpotential umfassend zu nutzen, müssen Windenergieanlagen

auch an vereisungsgefährdeten Standorten aufgestellt werden. Es wird geschätzt, dass ungefähr 20% der Windenergie an Orten mit Vereisungsgefahr realisiert werden könnte. Auch in der Schweiz werden eine Vielzahl von Windenergiestandorten mit den Problemen der Vereisung zu kämpfen haben, wie das Beispiel des Standortes Schwyberg FR (siehe Fig. 6) zeigt. Zum jetzigen Zeitpunkt belaufen sich die Energieproduktionsverluste an relativ stark- bis sehr stark vereisungsgefährdeten Standorten auf ca. 20–50% der jährlichen Windenergieproduktion.

Antifreeze Proteine erzeugen einen Unterschied zwischen Schmelz- und Gefrierpunkt von Wasser (siehe Fig. 5). Im Rahmen des Projektes **Antifreeze Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen** [6] wird untersucht, ob dieser bei arktischen Fischen festgestellte Effekt auch für die Nutzung der Windenergie im kalten Klima verwendet werden kann.



Figur 5: Antifreeze-Proteine (AFP) binden sich ans Eis, das jetzt zwischen zwei Proteinen herauswachsen muss. Die dadurch erzwungene Krümmung verringert den Gefrierpunkt (Gibbs-Thomson-Effekt). Quelle: C.A. Knight, *Nature* 406, 249 (2000).



Figur 6: Der aufgrund von hohen Eislasten und hohen Windgeschwindigkeiten geknickter Messmast auf dem Schwyberg, Kanton FR.

Anlässlich des Treffens der Projektgruppe des IEA Forschungsprojektes **Wind Energy in Cold Climates** [7] präsentierte der Projektverfasser Dr. Konstantin Siegmann von der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften erste Resultate zu diesen neuen und vielversprechenden Ansätzen zur Reduktion der Eisbildung an Rotorblättern.

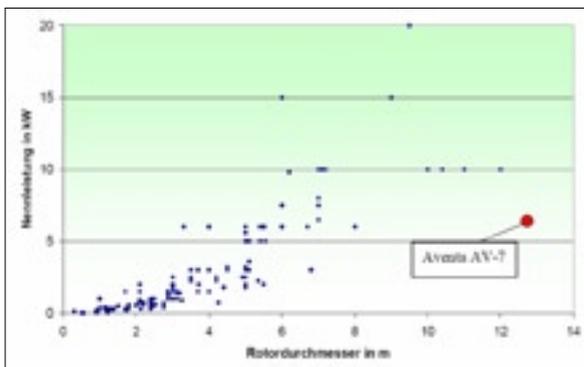
ENTWICKLUNG VON SPEZIFISCHEN KONZEPTEN

Die Firma *Aventa AG* vertreibt seit 2001 eine 7 kW-Windkraftanlage, deren herausragendes Designmerkmal ein übergrosser Rotor (12 m) ist. Aufgrund der aufwendigen Regelungstechnik können bereits relativ schwache Winde genutzt werden. Bei Windgeschwindigkeiten grösser als 6 m/s ist jedoch die Nennleistung der Anlage erreicht. Um eine weitere Förderung zur Optimierung dieser Anlage zu legitimieren, wurde von der Fachhochschule Technik und Wirtschaft in Berlin dieses Konzept grundsätzlich evaluiert (**Evaluation Leichtwindkonzept AVENTA** [8]). Deren Schlussfolgerungen sind:

Aus technischer Sicht besitzt die Windkraftanlage Aventa AV-7 ein Alleinstellungsmerkmal. Keine andere am Markt angebotene Windkraftanlage besitzt vergleichbare Spezifikationen (siehe Fig. 7). Die Ergebnisse weisen die konsequente Auslegung der Windkraftanlage Aventa AV-7 für niedrige Windgeschwindigkeiten nach. Für Standortbedingungen mit mittleren Windgeschwindigkeiten unter 4 m/s erbringt die Windkraftanlage Aventa AV-7 höhere flächenspezifische Energieerträge als Konkurrenzprodukte. Das Marktpotenzial ist einerseits gross, da es unzählige Standorte mit Windverhältnissen gibt, auf die die Windkraftanlage Aventa AV-7 zugeschnitten ist. Andererseits ergeben sich hohe Energiekosten, die sehr spezielle Kundenbedürfnisse treffen müssen, um eine Investitionsbereitschaft zu wecken. Dies könnte zum Beispiel der Fall sein, wenn standortbedingt keine konkurrierenden Energieversorgungskonzepte existieren bzw. deren Bereitstellung mit hohen Kosten verbunden sind. Dies führt zu Anwendungen im Inselbetrieb. Im netzgekoppelten Betrieb sind kaum Randbedingungen denkbar, die eine wirtschaftlich sinnvolle Nutzung von Windenergie unter diesen Spezifikationen ergeben.

AUFBAU KOMPETENZZENTRUM WINDENERGIENUTZUNG IM GEBIRGE

Konkretes Resultat des Forschungsprojektes **Alpine Test Site Gütsch: Meteorological measurements and wind turbine performance analysis**, welches im Rahmen der COST Action 727 [22] von 2005 bis 2008 durch das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (Meteo-Schweiz) und durch *Meteotest* durchgeführt wird, ist die Verbreitung der bisherigen Ergebnisse



Figur 7: Nennleistung und Rotordurchmesser im Marktsegment von 25 W bis 20 kW. Keine andere Anlage besitzt ein derart überdimensionierten Rotor bei entsprechender geringer Nennleistung wie die Aventa AV-7.

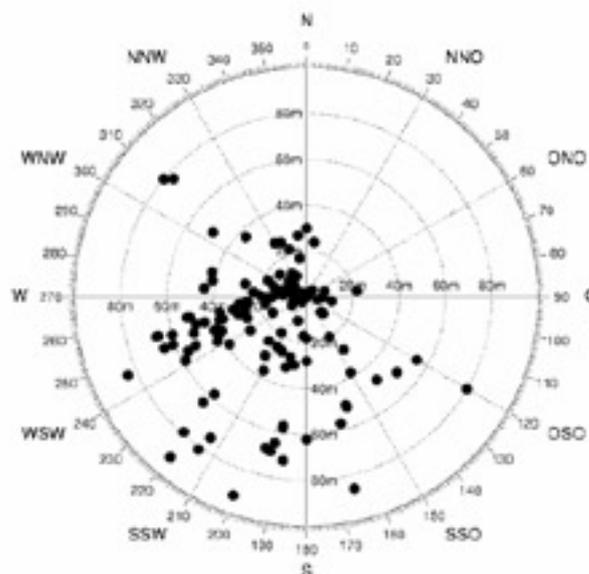
über eine Fachtagung und ein Handbuch (**Alpine Test Site Gütsch, Handbuch und Fachtagung** [9]). Am 21./22.6.2007 fand das mit über 40 Personen sehr gut besuchte internationale Seminar «Eis&Felsen» in Andermatt statt.

Sicherheitsaspekte aufgrund des Eiswurfes von Windkraftanlagen haben im IEA-Forschungsprojekt **Wind Energy in Cold Climates** [7] eine hohe Bedeutung. Dank den umfassenden Analysen und Datenerhebungen (siehe Fig. 8 und 9) kann die Schweiz mit den Resultaten vom Gütsch wesentlich zur Klärung dieser Fragenstellung beitragen.

An der Fachhochschule in Sion wird im Rahmen einer Marktrecherche (**Evaluation Windenergieanlage Simplon** [10]) ermittelt, welche kleineren Anlagen optimal für den Einsatz im Gebirge geeignet wären – ausgehend vom 17-jährigen Projekt auf der Simplonpasshöhe.

Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windanlagen in komplexem Gelände [11].

Grundlage für die Netzfürung und den Einsatz der konventionellen Kraftwerke ist der Lastfahrplan, d.h. der Betrag und der zeitliche Verlauf des Stromverbrauchs für die nahe Zukunft (bis zu einer Vorlaufzeit von knapp einem Tag). Dieser Fahrplan wird heute mit modernen, computergestützten Prognoseverfahren, aber auch mit konventionellen Methoden bestimmt. Unvorhergesehene Abweichungen vom Fahrplan, z.B. infolge von Kraftwerksausfällen oder unerwarteten Laständerungen müssen kurzfristig durch Regelenergie ausgeglichen werden, welche wesentlich teurer ist als Fahrplanenergie. Damit Windenergieanlagen nicht einen übermässigen Bezug von Regelenergie verursachen, werden Vorhersagemodelle eingesetzt. Die Bedeutung dieser Vorhersagemodelle ist in Ländern (Regionen) mit einem hohen Anteil von Windenergie besonders gross, weshalb die entsprechenden Modelle auch entsprechend ausgestaltet worden sind.



Figur 8: Grafische Darstellung der gefunden Eisstücke vom Rotor der Windkraftanlage auf dem Gütsch in Abhängigkeit der Richtung und der Distanz.



Figur 9: Auffinden und Dokumentieren der Eisstücke im alpinen Klima geschieht unter arktischen Bedingungen.

In der Schweiz ist der Anteil der Windenergie insgesamt noch sehr gering. Die geeigneten Standorte für Windenergieanlagen liegen mehrheitlich eher in dünn besiedelten Regionen (Jurahöhen, Alpenübergänge), weshalb für die betroffenen örtlichen Netzbetreiber der Anteil der Stromerzeugung aus Windenergie trotzdem ins Gewicht fallen kann. Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes **Anemos** [19] hat sich gezeigt, dass der mittlere Fehler von bestehenden Vorhersagemodellen im komplexen Terrain bis doppelt so hoch ist wie im Flachland. Bestätigt wird dies auch durch die Erfahrungen des Elektrizitätswerks Ursern.

Ziel des Forschungsprojektes ist die Erarbeitung und Validierung eines Vorhersagemodelles, welches für Windenergieanlagen in der Schweiz eine möglichst hohe Vorhersagegüte aufweist. Dabei sind insbesondere Standorte in den Alpen (Pass- und Tallogen) und im Jura zu berücksichtigen.

Nationale Zusammenarbeit

Folgende Forschungsinstitutionen haben Aktivitäten im Bereich der Windenergie entwickelt:

- Die EPFL (Laboratoire de Systèmes Energétiques LASEN) [24] 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** [5] statt.
- Das Labor für Strömungsmaschinen an der ETH Zürich [25] bekundet Interesse an einer Zusammenarbeit mit dem Forschungsprogramm Wind, speziell bez. Aerodynamik und Effizienz von Windturbinen und Aeroelasticity.
- An der Fachhochschule Wallis [20] bearbeitet ein Team Projekte zur Nutzung der Windenergie und betreibt auch die Windkraftanlage auf dem Simplon.

- An der Zürcher Fachhochschule Winterthur (ZFW) arbeitet eine Gruppe um Prof. Martina Hirayama an der Entwicklung von Nanooberflächen zur Verhinderung von Vereisung der Rotorblätter [21].
- Das IRAP (Institut für Raumentwicklung an der Hochschule für Technik Rapperswil) bearbeitet das Projekt **Planerische Voraussetzungen für die Nutzung der Windenergie** [1] und besitzt dadurch umfassendes Know-how zur Fragestellung Windenergie und Raumplanung.

Der Dreh- und Angelpunkt zur Förderung der Windenergie in der Schweiz ist *Suisse Eole, die Schweizerische Vereinigung zur Nutzung der Windenergie* (www.wind-energie.ch) [23]. Sämtliche Planungsinstrumente, insbesondere ein *Map-Server* mit allen relevanten Aussagen zu möglichen Windenergie-Standorten sind auf der Website <http://www.wind-data.ch/> vorhanden.

Internationale Zusammenarbeit

Seit 2002 beteiligt sich die Schweiz am IEA-Projekt **Wind Energy in Cold Climates (WECO)** [7]. 2006 fanden zwei Treffen der Experten statt. Die Arbeiten beim *Alpine Test Site Gütsch* sind mit diesem IEA-Projekt verknüpft. Dessen Resultate und Empfehlungen werden im Rahmen des Forschungsvorhabens *COST 727 Alpine Test Site Gütsch, Meteorological measurements and wind turbine performance analysis* [22] verifiziert und einem weiteren Umfeld nutzbar gemacht. Im Juni 2007 fand ein internationales Seminar «Eis&Felsen» zu diesem Projekt in Andermatt statt.

Am IEA Topical Expert Meeting zum Thema **«Social Acceptance»** vom Mai 2007 in Luzern wurde das Thema Akzeptanz weiter vertieft [4]. Die Schweiz wird im Kontext mit dem neu zu lancierenden IEA-Projekt zu Akzeptanzfragen eine führende Rolle einnehmen.

Die Fachhochschule Technik und Wirtschaft in Berlin evaluierte das **Leichtwindkonzept der Firma AVENTA** [8].

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Durch die Einführung der kostenbasierten Einspeisevergütung und dem Bundesgerichtsurteil zu Crêt Meuron sind die Voraussetzungen nun deutlich besser, um das ausgewiesene Potential der Windenergie in der Schweiz zügig zu erschliessen. Der im **Konzept Windenergie Schweiz** [16] dargelegte Grundsatz Windenergieanlagen an möglichst gut geeigneten Standorten zu konzentrieren geniesst breite Anerkennung – er wird insbesondere auch von den Kantonen im Rahmen kantonaler oder regionaler Grundlagenarbeiten angewandt. Die Betriebserfahrungen der installierten Windenergieanlagen sollen nun kontinuierlich erfasst werden. Die entsprechenden Erfahrungen dienen weiteren Projektentwicklern zur Optimierung ihrer Vorhaben.

Die **campagne de mesures (Erfolgskontrolle) éolienne 2 MW à Collonges VS** [12] hat erge-

ben, dass die 2-MW-Anlage *Enercon E70* der Firma Rhoneole in Collonges im Kanton Wallis nach wie vor mit Abstand am besten läuft.

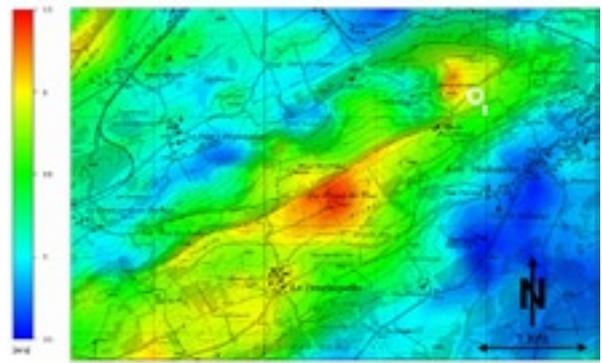
Mit dem Projekt **Betriebsresultate der Windenergieanlage Feldmoos** Rengg/Entlebuch auf 1020 m.ü.M. [13] werden bei einer 900 kW-Windenergieanlage die Betriebsergebnisse gesammelt.

Mit dem Projekt **Standortabklärungen Windkraftanlagen Peu Girard, Les Breuleux (JU)** [14] wurden die Bedingungen für eine WKA genauer untersucht (Figur 10).

Die Qualität eines Standortes hängt neben Aspekten des Naturschutzes und des Landschaftsbildes entscheidend von den vorhandenen Windverhältnissen ab. Mit dem **P+D-Rahmenprojekt Unterstützung Windmessungen** [15] werden folgenden Ziele verfolgt:

- Gezielte Unterstützung von Windmessungen/Windgutachten damit die ermittelten Daten öffentlich zugänglich gemacht werden;
- Die Genauigkeit des Windmodells Schweiz wird durch eine breitere Datengrundlage gezielt verbessert:
- Die Grundlagen zur Identifizierung geeigneter Standorte wird verbessert
 - für die Erarbeitung kantonaler Windenergiekonzepte zur Konkretisierung des Konzepts Windenergie Schweiz und
 - für unabhängige Projektentwickler.

Das Planungsrisiko für Projektentwickler wird durch einen finanziellen Beitrag an die Windmessung/Windgutachten reduziert. Suisse Eole führt dieses Förderungsprogramm administrativ.



Figur 10: Mittlere langjährige Windgeschwindigkeit 80 m über Grund in der Region Le Peuchappate / Les Breuleux. Geplanter Standort ist Peu Girard, nordwestlich von Les Breuleux (1, eingekreist).

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Vor dem Hintergrund der sich abzeichnenden kostendeckenden Einspeisevergütung ab 1.1. 2009 und den 2-jährigen Lieferfristen aller Anlagenherstellern hat sich auch im Jahre 2007 die installierte Leistung der Windkraftanlagen in der Schweiz nicht erhöht. Von den 31 Anlagen, welche während des ganzen Berichtsjahrs in Betrieb waren, wurden 15.3 GWh Elektrizität erzeugt. Dies entspricht einer Steigerung um mehr als 75% gegenüber dem Vorjahr.

Es zeichnet sich bereits heute ab, dass aufgrund der gesicherten finanziellen Rahmenbedingungen die Zahl von Windenergieprojekten stark zunehmen wird, analog der Entwicklung in Deutschland oder Spanien, welche ebenfalls eine kostendeckende Einspeisevergütung kennen. Im Rahmen der entsprechenden Verordnung soll sicher gestellt werden, dass diese Projekte nun mit einem geringen wirtschaftlichen Risiko realisiert werden können.

Vor dem Hintergrund der veränderten Rahmenbedingungen bestehen jedoch weiterhin Unsicherheiten für Projektentwickler, welche im Rahmen bisheriger oder neuer Forschungsprojekte geklärt werden müssen:

- Genaue und langfristige Vorhersage der Windressourcen (z.B. **Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände** [11]);
- Genehmigung der Umzonung des Standortes und/oder Erteilung der Baubewilligung (z.B. **Planerische Voraussetzungen für die Nutzung der Windenergie** [1]);
- Definieren und Durchsetzen von Qualitätsanforderungen an Projekte; wirkungsvolle Qualitätssicherung (**Alpine Test Site Güttsch, Handbuch** [9]);

- Zunehmende 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** [5]).

Technische und ökonomische Ziele im Energieforschungskonzept 2008-2011:

Heute sind technisch ausgereifte Windkraftanlagen mit Leistungen von 500 W bis 5 MW für Standardbedingungen auf dem Markt. Im Vordergrund der Forschung stehen daher:

- Entwickeln von Anlagekomponenten (Sensorik, Nano-Technologie) für die Nutzung von Windenergie unter spezifisch schweizerischen Verhältnissen durch einheimische Industrie.
- Erhöhung der Verfügbarkeit und des Energieertrages von Windkraftanlagen an extremen Standorten (Klima, Turbulenzen, Logistik).
- Erhöhung des «Wertes» der Windenergie, Optimierung der Integration von Windkraftanlagen in die Stromversorgung (Forecasting, Regelenenergie).
- Erhöhung der Akzeptanz für Windenergie unter Einbezug sozial- und umweltwissenschaftlicher Kompetenz und damit Verkürzung der Projektrealisierungsdauer.

Ergänzend sollen mit Pilot- und Demonstrationsprojekten die nichttechnischen Hemmnisse zur stärkeren Marktdurchdringung der Windenergie reduziert und die Lücke zwischen eigentlichen Forschungsaktivitäten und der Anwendung in der Praxis geschlossen werden.

Mit der Teststation auf dem Güttsch zur fundierten Ermittlung der Auswirkungen der Vereisung im Rahmen der **COST Action 727** und den ermittelten Forschungsergebnissen, erarbeitet sich die Schweiz auch internationales Renommee im Bereich der

Windenergienutzung im kalten Klima. Verbreitet und diskutiert werden die ermittelten Erfahrungen sowohl an internationalen Seminaren als auch in der Projektgruppe der IEA **Wind Energy in Cold Climates**.

Mit dem in Vorbereitung stehenden IEA-Projekt **Social Acceptance** 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 2007 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] Kurt Gilgen, Alma Sartoris (irap@hsr.ch), Institut für Raumentwicklung an der Hochschule für Technik Rapperswil (IRAP): **Planerische Voraussetzungen für die Nutzung der Windenergie** (SB Projekt 102'117) <http://www.irap.hsr.ch/>.
- [2] Walter Ott, Yvonne Kaufmann (walter.ott@econcept.ch), ECONCEPT AG, Zürich: **Auswirkung von Windkraftanlagen in der Schweiz** (JB) <http://www.econcept.ch/>.
- [3] Yves Leuzinger (info@bureau-natura.ch), NATURA Biologie Appliquée, Les Reussilles: **Eoliennes en Suisse et mortalité de chauves-souris** (SB Projekt 102'149) <http://www.bureau-natura.ch/>.
- [4] Robert Horbaty (robert.horbaty@enco-ag.ch), ENCO ENERGIE-CONSULTING AG, Bubendorf: **IEA Topical Expert Meeting »Social Acceptance«** (Protokoll) www.enco-ag.ch.
- [5] Christopher Tucci, Mary Jean Bürer (maryjean.burer@epfl.ch), EPFL, College of Management of Technology (CDM), Lausanne: **Social Acceptance of Wind Energy in Switzerland – To Invest or Not to Invest** (JB) <http://cdm.epfl.ch/home-page.php>.
- [6] Martina Hirayama (martina.hirayama@zhwin.ch), ZHAW, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Winterthur: **Antifreeze Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen** (JB) <http://www.zhwin.ch>.
- [7] Patricia Weis-Taylor (pwt_communications@comcast.net), NREL IEA-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development, Task 19: **Wind Energy in Cold Climates** (JB) <http://arcticwind.vtt.fi/>, <http://www.ieawind.org/>
- [8] Joachim Twele (twele@fhtw-berlin.de), Fachhochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin (D): **Evaluation Leichtwindkonzept AVENTA** (JB) <http://www.fhtw-berlin.de/>.
- [9] Stefan Kunz, René Cattin (KUNZ@METEOTEST.CH), METEOTEST, Bern: **Alpine Test Site Gütsch, Handbuch und Fachtagung** (JB) <http://www.meteotest.ch/cost727/index.html>.
- [10] Hans-Peter Biner (HPETER.BINER@HEVS.CH), Hochschule Wallis, Institut des systèmes industriels, Sion: **Evaluation Windenergieanlage Simplon** (JB) <http://www.hevs.ch/>.
- [11] Stefan Kunz, René Cattin (KUNZ@METEOTEST.CH), METEOTEST, Bern: **Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände** (JB) <http://www.meteotest.ch>.

Liste der P+D-Projekte

- [12] Jean-Marie Rouiller (jean.marie.rouiller@lausanne.ch), Services industriels de Lausanne, Lausanne: **Campagne de mesures (Erfolgskontrolle) éolienne 2 MW à Collonges VS** (JB) <http://www.lausanne.ch>.
- [13] Roland Aregger (INFO@WINDPOWER.CH), WINDPOWER AG, Entlebuch: **Betriebsresultate der Windenergieanlage Feldmoos** (JB) <http://www.windpower.ch>.
- [14] Eric Nussbaumer (info@adev.ch), ADEV, Liestal: **Standortabklärungen Windkraftanlagen Peu Girard, Les Breuleux** (SB Projekt 48'078) <http://www.adev.ch>.
- [15] Reto Rigassi, Robert Horbaty (info@suisse-eole.ch), SUISSE EOLE, Bubendorf: **P+D-Rahmen-Projekt Unterstützung Windmessungen** (JB) www.wind-energie.ch.

Referenzen

- [16] Bundesamt für Energie (BFE), Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Autoren Meteotest, Nateco, Metron Raumentwicklung AG, Atelier North & Robyr Soguel: **Konzept Windenergie Schweiz**, Grundlagen für die Standortwahl von Windparks, Bern, 2004, www.wind-energie.ch/images/1140/CH/KonzeptWindenergieCH-d.pdf.
- [17] Eidgenössische Energieforschungskommission CORE: **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007**, 2003, <http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/index.html?lang=de>.
- [18] R. Horbaty: **Energieforschungsprogramm »Windenergie« 2004 – 2007**, von der CORE am 1.4.2004 zur Umsetzung freigegeben.
- [19] The ANEMOS Consortium: **ANEMOS - Development of a Next Generation Wind Resource Forecasting System for the Large-Scale Integration of Onshore and Offshore Wind Farms**, <http://anemos.cma.fr/>.
- [20] H.-P. Biner (hpeter.biner@hevs.ch), Hochschule Wallis, Institut des systèmes industriels, <http://isi.hevs.ch/systemes/industriels/valais/conversionenergie.html>.
- [21] M. Hirayama (martina.hirayama@zhwin.ch), Zürcher Fachhochschule Winterthur, <http://www.zhwin.ch>.
- [22] COST-Aktion 727: **Alpine Test Site Gütsch**, <http://www.meteotest.ch/cost727/index.html>.
- [23] Schweizerische Vereinigung für Windenergie Suisse Eole, <http://www.suisse-eole.ch>.
- [24] Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire de systèmes énergétiques LASEN, <http://lasen.epfl.ch/page39406.html>.
- [25] R. Abhari, S. Barber, Labor für Strömungsmaschinen an der ETH Zürich, <http://www.lsm.ethz.ch/>.

NUKLEARE SICHERHEIT UND ENTSORGUNG

Konstantin Foskolos

konstantin.foskolos@psi.ch



Kriechverhalten von Hochtemperatur-Materialien

Im Projekt HT-MAT werden Strahlenschäden an Hochtemperatur-Werkstoffen für zukünftige Reaktoren untersucht. Die Bestimmung der Kriecheigenschaften dünner Plättchen (150 μm) spielt dabei eine bedeutende Rolle. Das Bild zeigt eine solche «Kriechapparatur».

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Nukleare Energieforschung in der Schweiz findet hauptsächlich im Forschungsbereich Nukleare Energie und Sicherheit (NES) des Paul Scherrer Institutes (PSI) statt, während Ausbildung in der Kerntechnik primär Aufgabe der Eidgenössischen Technischen Hochschulen von Zürich und Lausanne ist. Die Mission des NES wird von der Verordnung über die Forschungsanstalten des ETH-Bereichs abgeleitet. Sie wird ferner bestimmt von den Bedürfnissen an Forschung und wissenschaftlichen Dienstleistungen der nuklearen Gemeinschaft in der Schweiz, d.h. der Kernkraftwerk-Betreiber, 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 dort daher stabil gehalten werden. Für die strategische Planung wird weiter angenommen, dass heutige Reaktoren durch neue, mit den Nachhaltigkeitsgeboten noch kompatiblere ersetzt werden, und dass ein Lager für radioaktive Abfälle in der Schweiz gebaut werden soll. Die erforderlichen 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 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 und Sicherstellung einer *Stand-by*-Funktion in Schlüsselgebieten, insb. jene, welche ein Hotlabor benötigen,
- Bereitstellung von Input für Entscheidungen der «*Stakeholders*»,
- Förderung der Kernenergie mittels F&E in Richtung erhöhter Nachhaltigkeit, einschl. Sicherheit und Wirtschaftlichkeit,

- Angebot eines breiten Spektrums von Möglichkeiten für die Ausbildung junger Kernfachleute mit Erfahrung auch über andere Energiequellen,
- Unterstützung von und Nutzen aus der weltweit eingeleiteten «*Renaissance*» der Kernenergie.

Der NES ist in fünf Forschungslabors, entsprechend spezifischen wissenschaftlichen und technischen Kompetenzfeldern strukturiert; er betreibt darüber hinaus die Reaktorschule für angehende Reaktoroperateure (Techniker HF).

Labor für Reaktorphysik und Systemverhalten (LRS)

Die Aktivitäten im LRS haben einen direkten Bezug zur Kerntechnik-Ausbildung an der EPFL (Fission); die Forschungsprojekte im Labor bestimmen weitgehend den Rahmen von Doktor- und Diplomarbeiten. Die drei 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 Computer-codes und zur Reduktion von Unsicherheiten.
- STARS: Entwicklung, Betrieb und Unterhalt eines komplexen Codesystems inkl. Datenbasis für Sicherheitsanalysen (Transiente Systemanalysen mit Unsicherheitsanalyse, Brennstoff-Modellierung, Neutronikanalysen inkl. Kritikalitätssicherheit) für die Schweizer KKW.
- FAST: Entwicklung und Implementierung eines Codesystems nach dem Stand der Technik für Sicherheitsanalysen von nuklearen Systemen mit schnellen Neutronenspektren.

Labor für Thermohydraulik (LTH)

Die Aktivitäten im LTH fokussieren auf die Anwendung von Kenntnissen zur Wärme- und Stoffübertragung auf relevante Sicherheits- und Auslegungsfragen heutiger und zukünftiger Kernreaktoren. Dabei werden 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* (Blasenströmung,

Mischung/Stratifizierung...) mit Separat-effekt-Tests (Versuchsanlagen PANDA und LINX); Entwicklung/Validierung neuer Methoden und *Computercodes*, einschl. 3D-Effekte u. a. mit CFD.

- Schwere Unfälle: Experimentelle Untersuchung des Aerosolverhaltens (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 Schweizer KKW.

Labor für Werkstoffverhalten (LWV)

Das LWV untersucht (stark radioaktive) Materialien und Komponenten und ihre umgebungsbedingte Veränderungen, insbesondere durch (a) Studium der Alterungsvorgänge und damit gekoppelter Komponentenschäden und (b) Nachbestrahlungsuntersuchungen nuklearer Brennstoffe. Das LWV betreibt das PSI-Hotlabor mit schwerer analytischer Infrastruktur. Die drei Hauptprojekte im Rahmen der aktuellen LWV-Aktivitäten sind:

- Core Material Behaviour: Mikrostrukturelle/mikromechanische Untersuchungen sowie modelltheoretische Arbeiten zur Alterung von Kerneinheiten (Brennstäbe, Strukturmaterialien). Untersuchung von Schäden und Identifizierung von Versagensursachen. Formulierung von Vorschlägen für technologische Verbesserungen auf diesem Gebiet in Zusammenarbeit mit KKW-Betreibern und Brennstoffherstellern.
- Bauteilsicherheit: Feststellung von Ermüdungs- und Korrosionsrissen in einem frühen Stadium ihrer Bildung mittels zerstörungsfreier Methoden basierend auf mikrostrukturellen Veränderungen; experimentelle Bestimmung qualitätsgesicherter Daten für Spannungsrisskorrosion unter KKW-Betriebsbedingungen.
- Hochtemperaturmaterialien (HT-MAT): Charakterisierung von Werkstoffen für den Einsatz in (insb. gasgekühlten) Reaktoren der *Generation IV* bei signifikant höherer Betriebstemperatur und stärkerer Strahlung; Entwicklung mechanistischer Modelle zur Voraussage ihres Verhaltens.

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-Team eine mikroXAS-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 wird auch das FEMTO-Projekt zur Untersuchung zeitabhängiger Phänomene umfassen.

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 vielen anderen) decken die LEA-Aktivitäten drei Hauptgebiete:

- 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 schweizerischer, 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 bei den probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

Wie aus der vorangegangenen Einleitung ersichtlich sind die Arbeiten im Rahmen der NES-Projekte breit gefächert und facettenreich, um die unterschiedlichen Bedürfnisse und Interessen der schweizerischen nuklearen *Community* entspre-

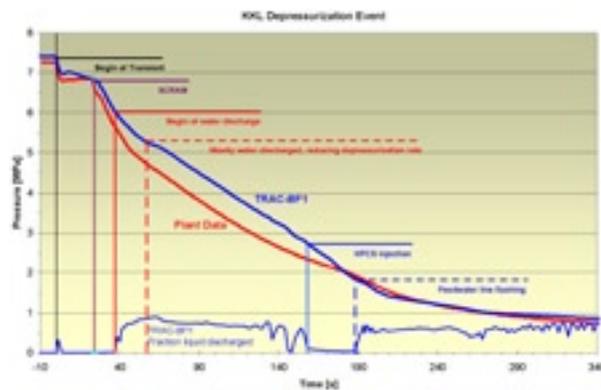
chen zu können. Eine detaillierte Berichterstattung darüber würde den Rahmen dieses Berichtes sprengen. Die untenstehenden Ergebnisse entsprechen daher nur Teilen der jeweiligen Projekte und sind als Beispiele zu verstehen.

SICHERHEIT UND SICHERHEITSBEZOGENE BETRIEBSPROBLEME SCHWEIZERISCHER KERNKRAFTWERKE

STARS (Sicherheitsexpertise und -forschung bezüglich Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz) [1]

Das Projekt findet in enger Zusammenarbeit und mit Unterstützung der HSK statt. Eines der Ziele von STARS ist die Entwicklung und der Erhalt von Simulationswerkzeugen nach dem Stand der Technik zur Unterstützung der HSK mit dem notwendigen Niveau von Expertise in Sachen LWR-Sicherheit. In diesem Sinne wurde im März 2007 STARS angefragt, eine technische Überprüfung des fehlerhaften Aktivierens des automatischen Druckentlastungssystems für das Nachwärmeabfuhr-Notsystem (SEHR-ADS), welches sich in einem Schweizer KKW am 6. März ereignete, an die HSK zu liefern. Vorläufige Ergebnisse lagen bereits 24 Stunden nach Erhalt der Anfrage vor. Dieses Ereignis wurde initiiert durch eine falsche Aktivierung der Division 51 des automatischen Druckentlastungssystems (ADS). Danach wurde der Reaktor über das Signal für das Wasserniveau («Niveau 3») im Reaktordruckbehälter (RDB) automatisch abgeschaltet. Die Reaktorabschaltung führte zur Isolation der Dampfleitungen, des Speisewassersystems und des Containmentgebäudes. In der Folge reduzierte sich das Wasser im Reaktor wenige Minuten später auf das «Niveau 2» und die Umwälzpumpen wurden auch abgeschaltet. Während der Druckentlastungsphase wurde der Verlust durch die Sicherheitsventile (SRV) von Wasserinventar im RDB kompensiert durch Einspeisungen vom Hochdruck-Kernsprühsystem (HPCS) ins obere Plenum und von der Reaktorkern-Isolationskühlung (RCIC) in die Speisewasserleitung. Später, als die ADS-Entlastungsventile wieder geschlossen waren, wurde das RCIC dazu genutzt, das Wasserniveau im RDB zu kontrollieren, während die SRVs zur Kontrolle des Reaktordrucks genutzt wurden. Es war folglich zu bestimmen, inwiefern das Aufschäumen des Wassers im RPV ausreichend war, um das Niveau der Mischung in die Nähe des Dampfleitungsstützens anzuheben und einen Flüssigkeitseintrag in die Dampfleitung zu verursachen. Die Analyse mit einem validierten Anlagemodell für den Code TRAC-BF1 zeigte klar, dass Flüssigkeit vom Dampf durch die SRVs mitgetragen wurde (Fig. 1).

Die berechnete Menge ist sehr wahrscheinlich überschätzt wegen Begrenzungen der Modellierung (räumliche Auflösung). Bemerkenswert ist die einmalige Fähigkeit des PSI-Modells, das Ausmass des Einströmens in den RDB, das vom Aufschäumen des Wassers im Speisewassersystem (infolge der Druckabsenkung) verursacht wird, auf der Basis separater Berechnungen mit



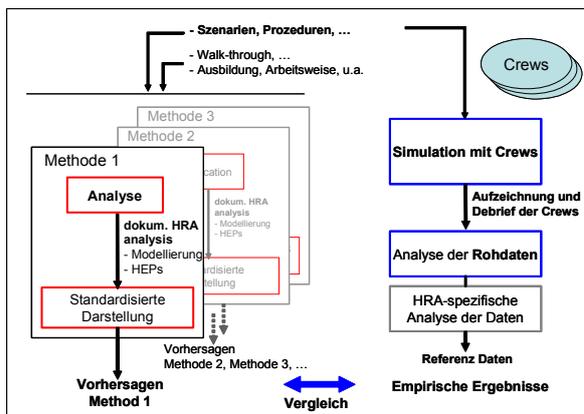
Figur 1: Simulation des Ereignisses «Fehlerhaftes Aktivieren von SEHR-ADS». Es wird die Entwicklung des berechneten und gemessenen Reaktordrucks gezeigt, zusammen mit einer Abschätzung des Flüssigkeitsablasses durch die Sicherheitsventile.

einem sehr detaillierten Modell dieses Systems zu ermitteln

Human Reliability Analysis (HRA) [2]

Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit und mit Unterstützung der HSK durchgeführt. Gegenwärtig wird auf dem Gebiet der Risikoanalyse eine Vielfalt von Methoden für die Analyse und Quantifizierung von Personalhandlungen verwendet. Die Unterschiede in den Ergebnissen der verschiedenen Methoden waren der Anlass für einen Vergleich ihrer Leistungsfähigkeit. Die «International HRA Empirical Study», die gegen Ende 2006 initiiert wurde, basiert auf Vergleichen der mittels verschiedener HRA-Methoden erzeugten Prognosen mit Daten über das Verhalten von Operateuren, die Unfallsituationen in einem Simulator bewältigen (Fig. 2). Die Hauptaufgabe 2007 war eine Teststudie mit den Zielen: a) die Vergleichsmethodologie in einem Versuch mit HRA-Teams und Mannschaften zu überprüfen, b) Akzeptanz für die Methodologie zu schaffen, und c) die praktische Brauchbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse über die Methoden zu demonstrieren. OECD-Halden, welcher den Simulator betreibt, hat die Studie mit ihren Kompetenzen auf den Gebieten der Arbeitspsychologie und von Simulatorexperimenten unterstützt. Eine Kombination von Forschungsinstituten, Kernkraftwerken, und Behörden deckte die Fachgebiete probabilistische Sicherheitsanalyse, HRA, und Anlagebetrieb ab: die US NRC, Sciencetech für EPRI, Sandia und Idaho National Laboratories; EDF und IRSN, VTT, Ringhals und Vattenfall, KAERI, und das PSI. Das Projekt HRA leistete Beiträge in der Lenkungs- und der Beurteilungsgruppe, bei der Entwicklung der Bewertungsmethodologie, der Analyse der Simulatordaten, und beim Vergleich der Resultate. Unabhängig davon haben Projektmitglieder als eigenes HRA Team mitgewirkt und eine am PSI entwickelte Methode eingesetzt.

Die Teststudie umfasste HRA-Analysen, die Ausführung einer Serie von Szenarien mit lizenzierten Mannschaften am Simulator, die Erhebung und Auswertung der Daten, und der Vergleich von empirisch festgestellten wichtigen Einflüssen und beobachteten Personalverhalten mit den Prognosen. Die Methodologie und erste Resultate wurden in einem Berichtentwurf erfasst und auf einem Workshop mit allen Beteiligten evaluiert. Die Methodologie wurde positiv bewertet und akzeptiert. Bezüglich Methoden sowie Verhalten des Personals können aufschlussreiche Erkenntnisse gewonnen werden. Mit Unterstützung der Kooperationspartner wird die *Empirical Study 2008* fortgesetzt.



Figur 2: Ablaufschema der International HRA Empirical Study.

PROTEUS-Experimente [3]

Die Aktivitäten finden mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW statt. Im 2007 war die Testzone des Forschungsreaktors PROTEUS nur mit eigenen Brennstoffstäben beladen (5% angereichertes UO_2). Die Testzone wurde damit als ein «*Supercritical-Water Cooled Reactor (SCWR)*» konfiguriert, eins der *Generation IV* Reaktorkonzepte, mit dem zusätzlichen Vorteil, dass der Reaktor mit relativ wenig Brennstoff kritisch gemacht werden konnte (Fig. 3). Daneben diente die Testzone aber auch als Testgitter für den Einsatz von abgebrannten LWR-Brennstabsegmenten, um neue Messtechniken für das geplante Experimentierprogramm «*LIFE@PROTEUS*» zu entwickeln. Das Hauptziel war die Messung von zusätzlich induzierten Spaltraten in diesen abgebrannten Brennstoffsegmenten. Im ersten Semester wurden Messungen nur im (radialen) Kernzentrum vorgenommen. Die experimentelle Anordnung bestand aus einem Transportbehälter kombiniert mit einem Probenwechsler – die sogenannte Wechselflasche – wobei die Proben in einem zentralen Führungsrohr oszilliert wurden. Es konnte gezeigt werden, dass eine gleichzeitige Messung von bestehenden und neu erzeugten Spaltprodukten in den abgebrannten Proben möglich ist. Im zweiten

Semester wurden Transportbehälter und Steuerung modifiziert um bis zu sechs Proben gleichzeitig in den Kern einzufahren und danach auszumessen. Gegenwärtig werden umfangreiche Kalttests mit inaktiven Stahlproben durchgeführt. Neben den obenerwähnten Tätigkeiten hat das Team «*Experimentelle Reaktorphysik*» im Rahmen der internationalen VENUS-EOLE-PROTEUS Zusammenarbeit Methoden und Ergebnisse der Messung von kurzlebigen Spaltprodukten diskutiert und weiterentwickelt. Frühere Messungen in der mit SWR-Brennelementen bestückten Testzone wurden auch im 2007 analysiert und haben einige interessante Resultate erbracht. Beispielsweise gibt es seit einem Jahr neue Neutronenwirkungsquerschnitte fürs Gadolinium, welche zu einer besseren Übereinstimmung zwischen analytischen und experimentellen Resultaten führen. Für die geplanten anspruchsvollen Experimente mit grösseren Mengen von abgebranntem LWR-Brennstoff muss die gesamte Anlage modernisiert und der Reaktor neu ausgelegt werden. Dazu wurde am 27. April 2007 das Gesuch für die Bau- und Betriebsbewilligung eingereicht, worauf die HSK im November das Resultat einer Grobprüfung präsentierte. Das PSI wird alle noch offenen Fragen beantworten und aufgrund der positiven Beurteilung dieses Projekt mit höchster Priorität vorantreiben.



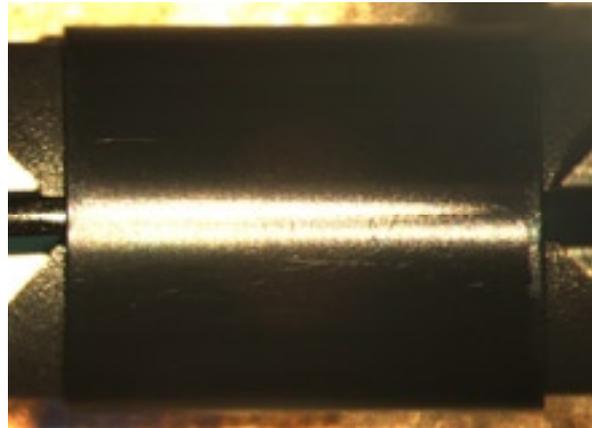
Figur 3: PROTEUS Testzone in der SCWR-Konfiguration.

CMB (Core Materials Behaviour) [4]

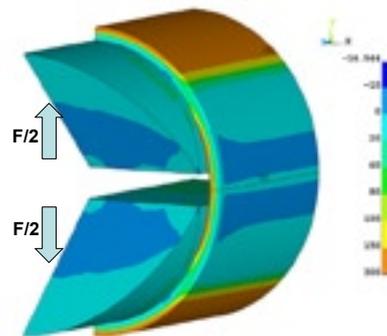
Das Projekt «*Verhalten von Kernmaterialien*» findet in enger Zusammenarbeit und mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW statt. In der Schweiz sollen abgebrannte Brennelemente nach einer Abkühlperiode in einem Becken im Kern-

kraftwerk trocken zwischengelagert werden. Während der Phase der Vakuumtrocknung vor dem Transport ins Zwischenlager und bei der trockenen Zwischenlagerung kann sich das Hüllrohr auf über 350 °C erwärmen. Dabei wird Wasserstoff, der durch den Oxidationsprozess im Metall aufgenommen wurde und als Hydrid ausgeschieden war, zum Teil in fester Lösung in der Metallmatrix erneut gelöst. Beim anschließenden Abkühlen wird die Löslichkeitsgrenze wieder überschritten und es scheiden sich erneut Hydride aus. Da diese eine kleinere Festigkeit aufweisen als die Metallmatrix, schwächen sie das Hüllrohr. Dies gilt besonders dann, wenn die Hydridplatten radial ausgeschieden sind. Dies ist normalerweise nicht der Fall. Liegen allerdings genügend hohe Umfangsspannungen vor, erfolgt diese Hydrid-Reorientierung senkrecht zur Hauptspannungsrichtung und das Hüllrohr wird tatsächlich geschwächt. Auch an Risspitzen können sich Hydride durch die lokalen Spannungen orientiert ausscheiden. Versagen die Hydride dann unter der Spannung, tragen sie zum Risswachstum bei. Man spricht hier von «*delayed hydride cracking*». Für hochabgebrannte Brennstäbe, die einen signifikanten Wasserstoffgehalt aufweisen, kann dies neben «Kriechen» ein Faktor sein, der die maximal zulässige Spaltgasfreisetzung oder den maximal zulässigen Abbrand definiert. Das PSI verfolgt in internationaler Zusammenarbeit ein Forschungsprogramm, das helfen soll, Limiten für die trockene Zwischenlagerung von hochabgebrannten Brennelementen zu definieren. In einem ersten Schritt wurde die erforderliche Spannung bestimmt, ab der es zur Hydrid-Reorientierung in unbestrahlten, hydrierten Hüllrohren kommen kann. Dazu wurde ein spezieller Versuchsaufbau in Kombination mit Finite Element Berechnungen entwickelt (Fig. 4a, b, c). Resultate von Versuchen mit inaktivem, aufhydriertem Zircaloy-2 liegen vor. Der Schwellwert für die Hydrid-Reorientierung kann sehr reproduzierbar auf wenige MPa genau bestimmt werden. Er wächst mit zunehmendem Wasserstoffgehalt und liegt zwischen 75 und 110 MPa. Dies kann erklärt werden mit der grösseren Menge an Hydriden, die bei höheren Wasserstoffgehalten bei der Maximaltemperatur nicht aufgelöst werden und als Keime bei der Ausscheidung von neuen Hydriden zur Verfügung stehen. Dies ist in Übereinklang mit experimentellen Resultaten anderer Forschergruppen. Es wurde auch gezeigt, dass wiederholtes Aufheizen und Abkühlen zwar den Anteil an reorientierten Hydriden vergrössert, dass sich der Schwellwert für die Reorientierung aber nicht ändert. In einem nächsten Schritt soll festgestellt werden, ob diese Schwellspannung auch für bestrahltes Material gilt. Dazu wurde der gesamte Versuch in einer $\alpha/\beta/\gamma$ -Abschirmung aufgebaut und alle Handhabungen für den Betrieb mit Manipulatoren angepasst. Ausserdem wurden hochabgebrannte Hüllrohrabschnitte aus Schwei-

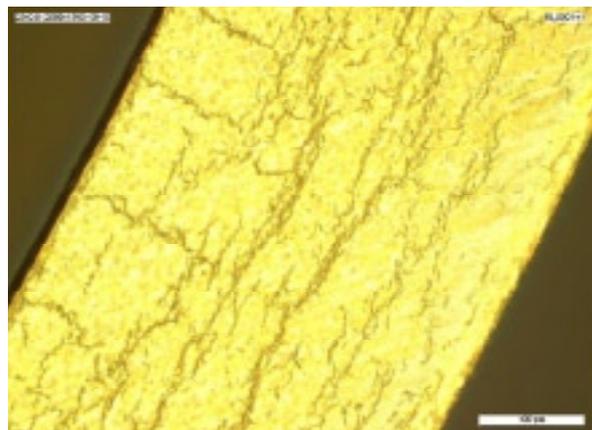
zer Kernkraftwerken mechanisch und chemisch vom Brennstoff befreit und stehen nun als Probenmaterial zur Verfügung.



Figur 4a: Hüllrohrring über zwei Halbzylindern.



Figur 4b: FE-Modell, mit dem die lokalen Spannungen im Hüllrohrring berechnet werden.

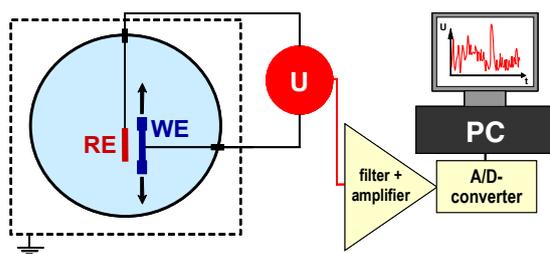


Figur 4c: Schliff des Hüllrohrs: Die Umfangsspannung links führt zu Hydrid-Reorientierung und liegt damit über dem Schwellwert.

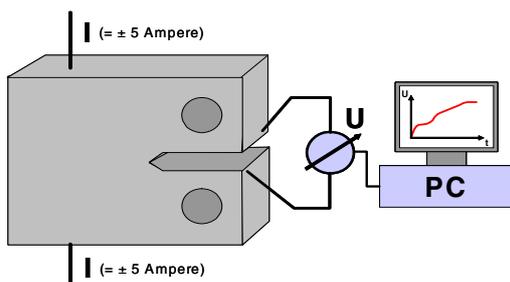
INTEGER (Bauteilsicherheit) [5]

Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit und mit finanzieller Unterstützung der HSK durchgeführt. Im Rahmen des INTEGER-Teilprojektes KORA wird das Risskorrosionsverhalten von austenitischen Strukturwerkstoffen und Mischnähten unter Leichtwasserreaktorbedingungen unter-

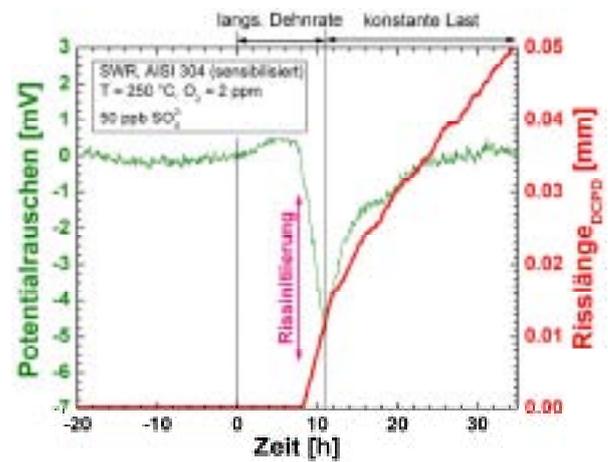
sucht, da in der näheren Vergangenheit weltweit eine Vielzahl von Rissbildungen in diesen Werkstoffen sowohl in Siede- als auch Druckwasserreaktoren aufgetreten sind. Die Messung des elektrochemischen Rauschens stellt derzeit die einzige aussichtsreiche «In-Situ» Korrosionsmonitoring-Methode dar, die das Potential hat solche Rissbildung durch Spannungsrissskorrosion (SpRK) in einem frühzeitigen Stadium zu detektieren. Deshalb wird diese Methode im Rahmen eines KORA-Teilprojektes näher erforscht. Unsere ersten Untersuchungen mit elektrochemischen (Potential-) Rausch- (Fig. 5a) und gleichzeitigen Risswachstumsmessungen mittels der Gleichstrompotentialsonden-Methode (Fig. 5b) zeigen, dass die Entstehung einzelner Oberflächenrisse und oberflächennahes Risswachstum infolge SpRK in hochreinem Heisswasser, zumindest im Labormassstab, mit elektrochemischen Rauschmessungen detektiert werden kann (Figur 5c). So ist es gelungen, einzelne interkristalline semi-elliptische Oberflächenrisse mit einer Oberflächenrislänge und Risstiefe im Bereich von 150 μm zu detektieren. In hochreinem Heisswasser ist die Methode sehr oberflächensensitiv, sie kann aber andererseits Risswachstum in Tiefenrichtung aufgrund des hohen Elektrolytwiderstandes nicht verfolgen (Figur 5c). Die beobachtete Polarität und Form der Potential- und Stromrauschsignale deuten darauf hin, dass ein lokaler mechanischer Bruch der oxidischen Schutzschicht sowie die nachfolgende lokale, anodische Metallauflösung und die Neubildung der oxidischen Deckschicht in den Rissbildungsprozess bei der interkristallinen SpRK in sensibilisierten rostfreien Stählen in sauerstoffhaltigem Heisswasser involviert sind.



Figur 5a: Schematischer Messaufbau einer elektrochemischen Potentialrauschmessung.



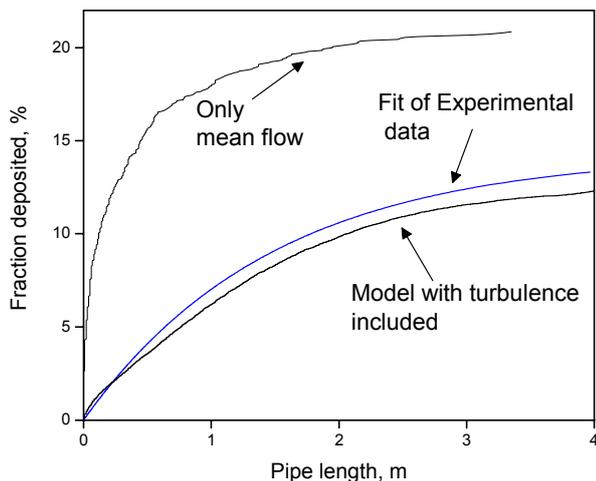
Figur 5b: Schematischer Messaufbau einer Gleichstrompotentialsondenmessung.



Figur 5c: Ergebnis einer kombinierten elektrochemischen Rauschmessung mit Gleichstrompotentialsondenmessung während eines Zugversuches mit einer Kompaktzugprobe unter simulierten SWR-Bedingungen

Forschung zu Schweren Unfällen [6]

Die Aktivitäten zu diesem Thema laufen mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW. Eines der zentralen Themen ist das Verhalten von radioaktiven Aerosolpartikeln, die sich nach einem hypothetischen Reaktorunfall mit Kernschmelzen bilden und zur Umwelt gelangen könnten. Aktuelle direkte numerische Simulationen (DNS) und Experimente zeigen, dass Partikel bei denen die Trägheitskräfte nicht vernachlässigt werden können, in isothermen, turbulenten Grenzschichten, Wolken mit hoher Konzentration bilden, während näherungsweise trägheitsfreie Partikel, die der Strömung gut folgen, homogen verteilt bleiben. Deswegen wird auch erwartet, dass Turbulenzstrukturen in der Grenzschicht einer Strömung die thermophoretische Ablagerung, abhängig von der Partikelträgheit, beeinflussen. Um die Partikelverteilung in diesen Strömungen (Turbulenz & Thermophorese) auch auf der Basis nur des mittleren Strömungsfeldes ($k-\epsilon$, Reynolds stress etc.) adäquat zu beschreiben, wurde ein Lagrange'sches «continuous random walk» (CRW) Modell entwickelt. Das darin enthaltene Modell zur Partikelbahnbestimmung verwendet Ergebnisse des mittleren, dreidimensionalen Strömungsfeldes aus CFD Rechnungen mit dem Code FLUENT, sowie berechnete Euler-Statistiken der Momentangrößen aus DNS-Rechnungen. Der Momentanwert der Strömungsgeschwindigkeit des aktuellen Zeitschrittes wird dabei aus der Geschwindigkeit des vorherigen Zeitschrittes mit Hilfe einer Markov-Kette berechnet, die auf der normierten Langevin Gleichung basiert. Dadurch werden turbulente Inhomogenitäten berücksichtigt. Zusätzlich enthält das Modell eine Korrektur, die die unphysikalische, trägheitsfreie Partikelbewegung hin zur Wand kompensiert. Damit erhält man für isotherme Strömungen deutlich bessere Ergebnisse als



Figur 6: Vergleich zwischen den mit dem CRW Modell berechneten Ergebnissen und den Phebus FPT1 Experimenten.

bisher. Anfänglich homogen verteilte trägheitsfreie Partikel bleiben während der Rechnung auch weiterhin homogen verteilt. Zusätzlich erhält man dann bei der Rechnung, wie erwartet, verschwindend kleine Abscheidengeschwindigkeiten.

Die durch die Thermophorese auf die Partikel zusätzlich wirkende Kraft wird entsprechend der Formulierung von Talbot modelliert, da seine Ergebnisse die beste Übereinstimmung mit einer grossen Anzahl von Ergebnissen liefert. Testrechnungen mit diesem Modell für die integrale, thermophoretische Abscheidung von Partikeln in verschiedenen Konfigurationen einschl. des FPT1-Experimentes im Phébus-Reaktor mit detaillierten, lokalen Partikel-Abscheidemessungen zeigen (Fig. 6), dass die Beschreibung des vorgestellten Problems mit einem Lagrange'schen CRW Ansatz, sowie durch die Kopplung mit DNS Ergebnissen aus der Eulerischen Statistik und CFD Ergebnissen für das mittlere Strömungsfeld, die genaue Bestimmung der Partikelverteilung erlaubt. Damit wird auch die Beschreibung der thermophoretischen Partikelabscheidung in einer turbulenten Strömung möglich.

Entsorgung Radioaktiver Abfälle [7]

Die F&E zur Entsorgung radioaktiver Abfälle am PSI spielt national eine wichtige Rolle, indem sie die Bundesbehörden und die Nagra bei ihrer Aufgabe zur sicheren Entsorgung der Abfälle aus den KKW, aber auch aus Medizin, Industrie der Forschung unterstützt. Tonformationen wie der Opalinuston werden unter anderem wegen ihrer sehr geringen Wasserdurchlässigkeit als Wirtsgesteine für die geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle in Betracht gezogen. Gerade diese geringe Permeabilität führt aber zu grossen Schwierigkeiten bei der Entnahme von repräsentativen Porenwasserproben. Eine genaue Kenntnis der Porenwasserzusammensetzung ist unerlässlich,

um das Transport- und Retentionsverhalten von Radionukliden zu beschreiben. Deshalb muss als Ergänzung zur Probennahme auf geochemische Modellierungen zurückgegriffen werden, um die Porenwasserzusammensetzung zu berechnen. Diese wird im Opalinuston vor allem durch die Löslichkeitsgleichgewichte der gesteinsbildenden Mineralien und die Ionenaustauschgleichgewichte der Tonminerale bestimmt.

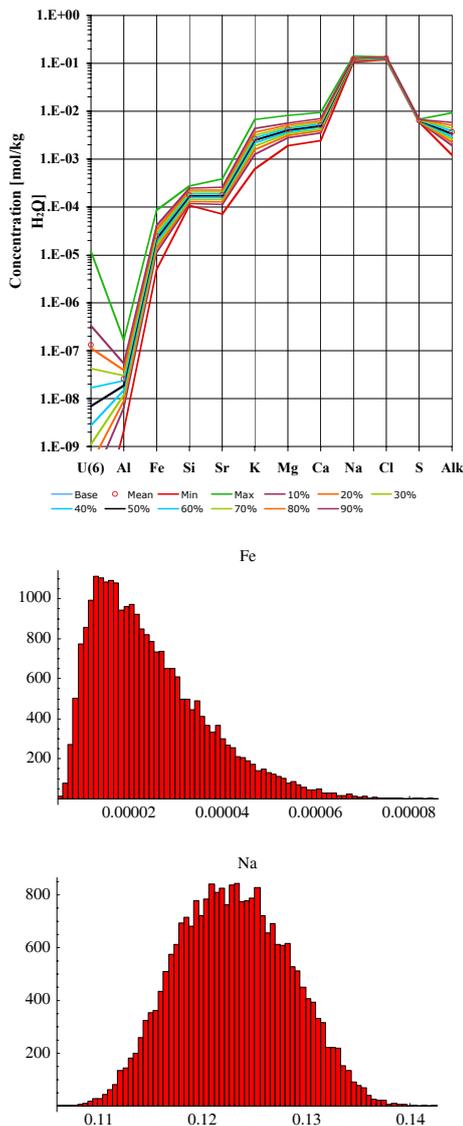
Der Hauptzweck eines am LES laufenden Projektes liegt darin, die Auswirkungen der Unsicherheit in den Eingabeparametern des geochemischen Modells auf die berechnete Zusammensetzung des Porenwassers zu bestimmen. Dazu bietet sich die Monte Carlo-Methode an, die aus einer Folge von zahlreichen Modellrechnungen besteht, bei denen von Rechnung zu Rechnung die Eingabeparameter innerhalb ihrer vorgegebenen Fehlergrenzen nach dem Zufallsprinzip variiert werden. Die Rechnungen werden solange durchgeführt, bis die aufgelaufenen Mittelwerte der berechneten Parameter sich nur noch innerhalb vorgegebener Grenzen bewegen (was meist nach wenigen tausend Iterationen der Fall ist). Die Streuung der errechneten Porenwasserzusammensetzung ist dann ein Mass für ihre Unsicherheit.

Solch eine Monte-Carlo-Unsicherheitsanalyse wurde für Porenwasser des Mont-Terri-Felslabors durchgeführt. Dabei wurden die folgenden Eingabeparameter mit ihren Unsicherheiten berücksichtigt: Die Löslichkeitskonstanten der gesteinsbildenden Mineralien, die Zusammensetzung der Ionenaustauschpopulation der vorhandenen Tonminerale, die Selektivitätskoeffizienten der entsprechenden Ionenaustauschgleichgewichte, sowie die nicht durch die Gesteinszusammensetzung bestimmten Konzentrationen von Chlorid und Sulfat und der CO_2 -Partialdruck. Die Streuung der berechneten Porenwasserzusammensetzung ist in einem Schoeller-Diagramm in Fig. 7 dargestellt. Bemerkenswert sind auch die Häufigkeitsverteilungen, die alle Übergänge von schiefen (Fe in Fig. 7) zu normalen (Na in Fig. 7) Verteilungen zeigen, und doch alle auf homogen verteilten Eingabe-Unsicherheiten basieren. Weiterführende Arbeiten sollen die hier dargestellte Unsicherheitsanalyse mit einer Sensitivitätsanalyse ergänzen, die zum Ziel hat, diejenigen Modellparameter zu bestimmen, die den grössten Einfluss auf die resultierende Porenwasserzusammensetzung haben.

SICHERHEITSBEZOGENE MERKMALE ZUKÜNFTIGER REAKTORKONZEPTE

Hochtemperaturmaterialien (HT-MAT) [8]

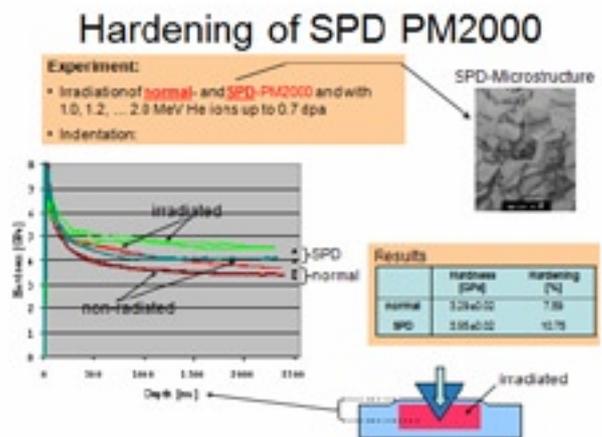
Das Projekt findet statt im Rahmen der Schweizer Beteiligung am *Generation IV International Forum* und ist zudem stark mit Forschungspro-



Figur 7: Monte Carlo-Unsicherheitsanalyse für Porenwasser des Mont Terri-Felslabors. Das Schoeller-Diagramm links zeigt die Streuung der berechneten Porenwasserzusammensetzung aufgrund der Unsicherheiten in den Eingabeparametern. Rechts sind die Häufigkeitsverteilungen der Konzentrationen (mol/kg H_2O) von Fe und Na dargestellt.

jekten der EU-Rahmenprogramme gekoppelt. Oxiddispersionsgehärtete Legierungen (ODS) sind aufgrund ihrer hervorragenden Hochtemperatureigenschaften potenzielle Werkstoffe für eine ganze Palette von Anwendungen in der moderneren Energietechnik. Im Rahmen der NES Forschungsarbeiten interessieren dabei besonders zukünftige gasgekühlte Reaktoren der *Generation IV*. Die traditionelle pulvermetallurgische Herstellung von ODS Werkstoffen (mechanisches Legieren in der Kugelmühle mit anschließender Kompaktierung /Umformung und Wärmebehandlung) liefert ein sehr grobkörniges Gefüge. Besonders für die Herstellung von Komponenten könnten feinkörnige Gefüge von Vorteil sein. Mit der Methode der «severe plastic deformation

(SPD)» bei der das Material massiv umgeformt wird, können sogar nano-kristalline Strukturen erhalten werden. In Zusammenarbeit mit Europäischen Partnern wird im Rahmen des Projektes «Hochtemperaturwerkstoffe» die Gefügestabilität von SPD-Legierungen in Hinblick auf Temperatur und Strahlungseinfluss untersucht und mit den Eigenschaften der kommerziellen ferritischen ODS-Legierung PM2000 verglichen. Erste Ergebnisse zum Einfluss einer Bestrahlung sind in der nachfolgenden Figur gezeigt. Dazu wurden beide Werkstoffe zunächst mit He-Ionen implantiert und anschliessend die strahleninduzierte Aufhärtung mit einem Nano-Indenter gemessen. Die Unterschiede konnten auf die höhere Versetzungsdichte und die stark reduzierte Korngrösse des SPD-Materials zurückgeführt werden (Fig. 8). Die Ergebnisse sind mit Modellierungen der Fließgrenze mit Methoden der Versetzungsdynamik (*dislocation dynamics*) sehr gut verträglich, nach denen die Verteilung und Grösse der Dispersoide den Hauptteil zur Verfestigung beitragen.



Figur 8: Strahleninduzierte Verfestigung der ferritischen ODS Legierung PM2000 mit verschiedenem Gefüge. Prinzipiell verläuft der Aufhärtungsvorgang für beide Werkstoffqualitäten gleich. Das SPD-Material besitzt bereits eine grössere Ausgangshärte.

ALPHA [9]

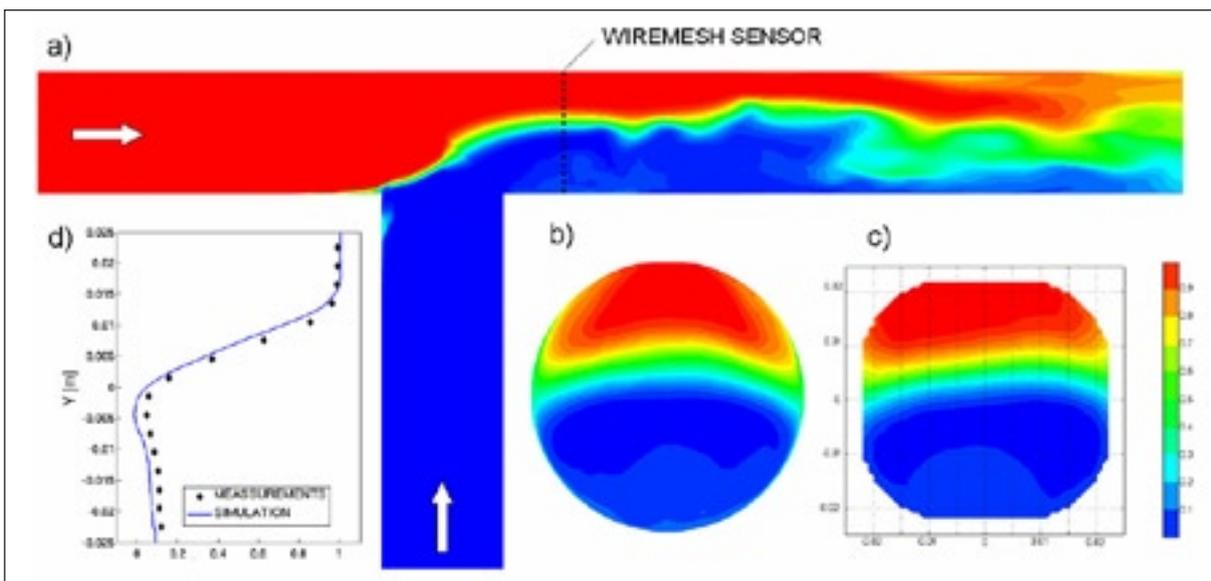
Thermisch induzierte Spannungen im Werkstoff sind eine wichtige Schadensursache in Kraftwerksanlagen. Zyklische mechanische Beanspruchungen einer Rohrleitung bis hin zum Bruch können zu einem Kühlmittelverluststörfall führen. Daher widmet sich das von den Schweizer KKW unterstützte Projekt PLIM (*Plant Life Management*) der Frage, ob und nach wie viel Lastzyklen es zum Bruch kommen kann. Dazu muss auch die thermische Beanspruchung bekannt sein, wie z.B. im Fall von Temperaturschwankungen bei An- und Abfahrprozessen. Schwieriger zu beschreiben ist die Vermischung von Flüssigkeitsströmen mit unterschiedlicher Temperatur. Bei der Zu-

speisung von Kühlmittel in den Primärkreis eines Kernkraftwerks z.B. verursacht die Turbulenz stochastische Temperaturschwankungen stromab der Einspeisestelle. Hierzu wurden Experimente an einer Einmündung in Form eines T-Stücks vorgenommen, das mit Wasser unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit versorgt wurde. Die Leitfähigkeit verhält sich als Vermischungsgrösse ähnlich, wie die Temperatur. Sie kann jedoch mit Hilfe eines Gittersensors gemessen werden. Dabei wird der Anteil des jeweiligen Teilstroms an der Mischung durch ein Gitter sich kreuzender Elektrodenröhre erfasst und so im gesamten Messquerschnitt mit einer Auflösung von 3 mm und einer Messfrequenz von maximal 10 kHz aufgenommen – eine Auflösung, die weltweit führend ist. Ziel der Experimente ist die Bereitstellung von Daten für die Entwicklung und den Test von Berechnungsverfahren. Turbulente Strömungsfelder in komplexen Geometrien können mit Hilfe CFD (Computational Fluid Dynamics)-Codes berechnet werden. Wenngleich es heute möglich ist, das Phänomen der Turbulenz als Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen selbst zu erhalten, werden zur Verringerung des immensen Rechenaufwands sogenannte Turbulenzmodelle benötigt, die die Strömungsgleichungen ergänzen, um die Simulation technisch relevanter Anwendungen zu ermöglichen. Eines der leistungsstärksten Modelle ist die sogenannte «Large Eddy Simulation» oder kurz LES, mit der Wirbelstrukturen zeitaufgelöst simuliert werden können. Wird zusätzlich zum Geschwindigkeitsfeld der Energietransport mitmodelliert, so können die Temperaturfluktuationen berechnet werden, die die thermischen

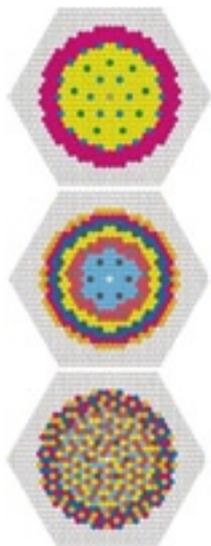
Beanspruchungen des Materials verursachen. Durch die Kombination von Experiment und Modellierung mit jeweils vergleichbarer zeitlicher und räumlicher Auflösung ist es erstmalig möglich, die Modelle einer tieferen Prüfung zu unterziehen (Fig. 9).

FAST [10]

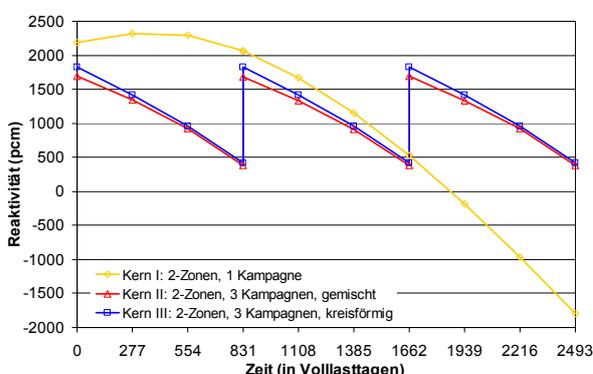
Das Projekt findet im Rahmen der Schweizer Beteiligung am *Generation IV International Forum* statt. Im Projektjahr wurden eine Methodik und die numerische Prozedur EQL3D (*EQuilibrium fuel cycLe 3D procedure*) für den Vergleich fortgeschrittener Reaktorkonzepte der *Generation IV* mit vollständig geschlossenem Brennstoffzyklus entwickelt. Diese Prozedur simuliert mehrmals den Ablauf des Brennstoffzyklus (Abbrand, Abkühlung und Aufarbeitung), bis ein Aktiniden-Gleichgewicht erreicht ist (Gleichgewichtsbrennstoffzyklus). Die EQL3D-Prozedur basiert auf dem ERANOS-Code und ergänzt optimal die am PSI entwickelte FAST-Code-Plattform. Sie ermöglicht eine Langzeitsimulation des Reaktorbetriebs, bei welchem Uran, Plutonium und höhere Actinide aus dem abgebrannten Brennstoff für die Fabrikation neuer Brennelemente verwendet werden. Ein Konzept, welches fast alle Aktinide rezykliert, könnte man «sauberer Abfall – verschmutzter Brennstoff» nennen. Dieses Konzept könnte einen Beitrag zur Verbesserung der öffentlichen Akzeptanz der Kernenergie liefern. Es bedingt aber die Weiterentwicklung der Aufbereitungsverfahren. Ausserdem ist für die Fabrikation ein Brennstoffzusatz als Spaltproduktersatz notwendig; dazu könnte Natu-



Figur 9: Vermischungsverhalten von Trinkwasser (rot) mit demineralisiertem Wasser (blau) in einem T-Stück – transiente LES-Simulation im Vergleich zu experimentellen Daten. a) Momentaufnahme der simulierten Konzentrationsverteilung in der Mittelebene des T-Stücks; b) mit transienter LES-Simulation berechnete, zeitgemittelte Konzentrationsverteilung in der Messebene (WIREMESH SENSOR) quer zur Strömung; c) zeitgemittelte gemessene Konzentrationsverteilung zur Illustration der Simulationsqualität; d) zentrales Konzentrationsprofil in der Messebene.



Figur 10a: GFR-Kernbeladungsstrategien I-III (↓)



Figur 10b: Reaktivitätsverlauf über die Zeit von 2493 Volllasttagen eines GFR-Gleichgewichtsbrennstoffzyklus für abgebrannten MOX-Brennstoff als Zusatzmaterial.

uran (als Brutmaterial) dienen. Ein sogenannter Isobrüter-Kernreaktor kann dann nur mit Natururan als Zusatzmaterial arbeiten. Als Zusatzmaterial könnte aber auch abgebrannter Brennstoff aus LWR dienen. Heutige Kernreaktoren brennen nur bis zu 5% der Actiniden (typisch für einen Abbrand von 48 GWd/t) ab; die übrigen 95% könnten in Zukunft bis zu 20mal mehr Energie in fortgeschrittenen Reaktorkonzepten erzeugen. Der Gasgekühlte Schnelle Reaktor (GFR) wurde als Vertreter solcher fortgeschrittener Reaktorkonzepte der *Generation IV* mit EQL3D simuliert, wobei der abgebrannte Schweizer MOX-Brennstoff nach 30jähriger Kühlung als Zusatzmaterial diente. Ein GFR-Brennstoffzyklus dauert 2493 Volllasttage. Für diese Studie wurden drei verschiedene Kernbeladungsstrategien (siehe Abb. 10a) entwickelt. Alle drei nutzen einen 2-Zonen-Kern. Im Fall I bleibt die Beladung des Kerns über den ganzen Zyklus unverändert (1 Kampagne). Im Fall II besteht der Brennstoffzyklus aus drei gleich langen Kampagnen mit identischen Kernbeladungen, wobei die Brennelemente mit glei-

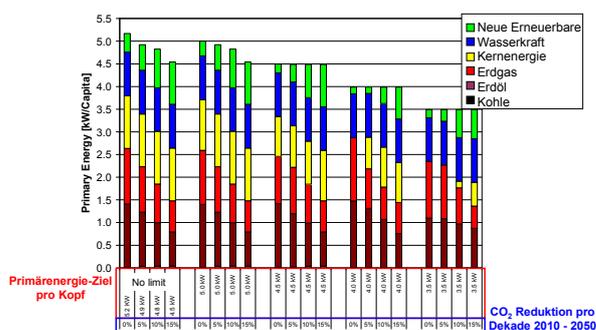
cher Abbrandgeschichte immer ringförmig gruppiert sind. Der Fall III unterscheidet sich vom Fall II dadurch, dass die Brennelemente durchmischt angeordnet sind. Als Beispiel ist hier der Reaktivitätsverlauf über einen GFR-Gleichgewichtsbrennstoffzyklus dargestellt (siehe Abb. 10b). Die Resultate für Ladestrategien mit 3 Kampagnen zeigen, dass abgebrannter MOX-Brennstoff als Zusatzmaterial in GFR verwendbar ist. Aus diesem Grund sollte der abgebrannte Kernbrennstoff von heute nicht als Abfall, sondern vielmehr als Rohstoff für die Zukunft betrachtet werden.

GANZHEITLICHE BETRACHTUNG VON ENERGIESYSTEMEN (GaBE)

Energieökonomie [11]

Im Berichtsjahr wurden mögliche Entwicklungen hin zu einem nachhaltigeren Schweizer Energiesystem bis zum Jahr 2050 untersucht. Mehr Nachhaltigkeit bedeutet in diesem Zusammenhang vor allem geringere CO₂-Emissionen und weniger Primärenergieverbrauch im Vergleich zu heute. Vor dem Hintergrund der globalen Erwärmung und der internationalen Klimapolitik sollten die Schweizer CO₂-Emissionen bis Mitte des Jahrhunderts um mindestens 50% gesenkt werden. Diese markante CO₂-Reduktion sollte vorrangiges Ziel der Energiepolitik sein, denn eine einseitige Fokussierung auf mehr Energieeffizienz alleine, d.h. weniger Energieverbrauch, zieht nicht automatisch deutlich weniger CO₂-Emissionen nach sich. Mit dem Einsatz der effizientesten Technologien kann der Pro-Kopf-Primärenergieverbrauch bis 2050 um maximal 30% auf 3500 Watt pro Person gesenkt werden. Beide Ziele – deutlich weniger CO₂-Emissionen und reduzierter Energieverbrauch – sind nur mit einer kompletten Umgestaltung des heutigen Energiesystems zu erreichen. Dazu bedarf es langfristiger und zielgerichteter Massnahmen, insbesondere im Gebäude- und Verkehrssektor, welche die grössten Beiträge liefern können.

Diese Umgestaltung ist nicht kostenlos: Die Halbierung der CO₂-Emissionen verursacht bis 2050 diskontierte, kumulierte Kosten von mindestens



Figur 11: Szenarien für das Schweizer Energiesystem im Jahr 2050 mit exogenen Randbedingungen bez. Primärenergieverbrauch und CO₂-Emissionen.

70 Mrd. Franken, unabhängig von der Reduktion des Primärenergieverbrauchs. Die Kosten steigen stark an, wenn der Energieverbrauch auf weniger als 4000 Watt pro Kopf gesenkt werden soll. Auch bei einem sinkenden Gesamtenergieverbrauch ist damit zu rechnen, dass der Strombedarf in unserer Dienstleistungsgesellschaft weiter moderat steigen wird. Das heisst, dass der Anteil der Elektrizität am Energieverbrauch zunehmen wird und somit eine CO₂-arme Stromproduktion entscheidend sein wird für eine wirkungsvolle CO₂-Reduktion. Fig. 11 zeigt den Primärenergieverbrauch pro Kopf im Jahr 2050 in der Schweiz (ausgedrückt als entsprechender Dauerleistungsbedarf in Kilowatt pro Kopf) als Ergebnis eines energieökonomischen Optimierungsmodells für das gesamte Schweizer Energiesystem bis zum Jahr 2050. Bei dieser Berechnung wird jeweils das kostengünstigste Energiesystem unter den definierten Randbedingungen bezüglich Primärenergieverbrauch und CO₂-Reduktion ermittelt. Die Halbierung der CO₂-Emissionen ist nur zu erreichen, wenn der Verbrauch an fossilen Energieträgern nahezu halbiert wird und gleichzeitig neue erneuerbare Energien ausgebaut und Kernenergie im Schweizer Energiemix beibehalten wird.

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-Beschleunigeranlagen ausgerüstet. Das Hotlabor, als PSI-Grossanlage ist gemäss Kernenergieverordnung eine der schweizerischen Kernanlagen und erfüllt die für solche Anlagen erforderlichen Sicherheitsstandards. Diesbezüglich wurde 2007 der Sicherheitsbericht erneut dem BFE zur Prüfung und Erneuerung der jetzigen, unbefristeten, aber alten Betriebsbewilligung eingereicht. Die Anlage wird von ca. 30 Mitarbeitenden betrieben, die verantwortlich für die Hausinstallationen, die Heissen Zellen aber auch für die anspruchsvolle

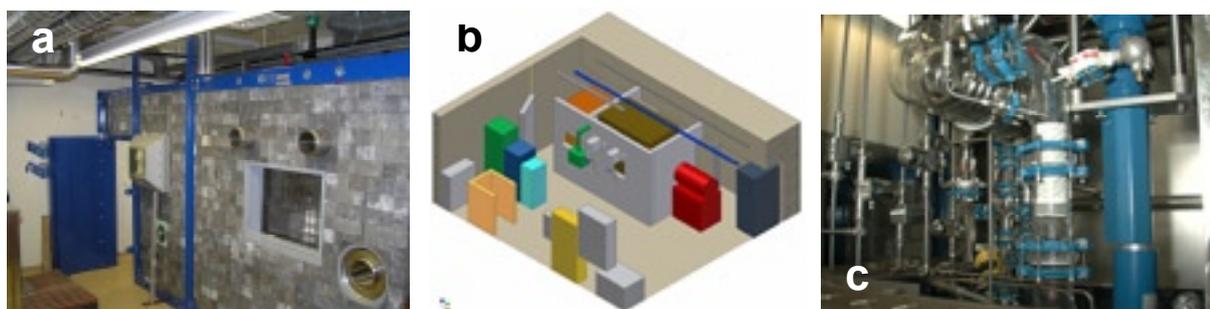
fortschrittliche Instrumentalanalytik sind. Die hauptsächlich bearbeiteten Forschungsschwerpunkte bestehen in der

- Charakterisierung des Bestrahlungsverhaltens von fortschrittlichen LWR-Brennstäben;
- Beurteilung der Radionuklidenausbreitung aus einem zukünftigen Abfall-Endlager;
- Untersuchung möglicher Strukturmaterialien für zukünftige Hochtemperaturreaktoren (Fission und Fusion);
- Eignungsabklärung von Containments aus einer Blei/Bismuth-Legierung für das PSI-Spallationstarget.

Im Berichtsjahr wurden mehrere Lüftungsanlagen revidiert, eine abgeschirmte Universal-Prüfmaschine zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Stählen wurde in Betrieb genommen und eine Anlage zur Zementierung stark radioaktiver Abfall-Flüssigkeiten wurde aufgebaut. In dieser Anlage werden die angelieferten Flüssigkeiten hinter schweren biologischen Abschirmungen in Unterdruckzellen zuerst durch Destillation eingengt und anschliessend zementiert (Fig. 12).

Mikro-XAS Beamline [13]

In der Schweiz werden rund 1/3 der aus Kernkraftwerken stammenden hochradioaktiven Abfälle nach einem Wiederaufarbeitungsprozess verglast. Trotz guter chemischer Stabilität, kann das resultierende Borosilicatglas in einem Tiefenlager durch wässrige Lösungen angegriffen werden. Rechnungen und umfangreiche Laborexperimente zeigen, dass das Glas unter Tiefenlagerbedingungen sich sehr langsam auflöst und geringe Mengen der darin enthaltenen Radionuklide freisetzt. Im hier beschriebenen Experiment wurde ein pulverisiertes, inaktives Schweizer Referenzglas zwölf Jahre lang unter tiefenlagerähnlichen Bedingungen in Wasser korrodiert (Fig. 13a). Durch das Zermahlen und die leichte Erhöhung der Temperatur auf 90 °C konnte man Alterungsbedingungen simulieren, die sonst erst nach Zehntausenden Jahren Korrosionszeit erreicht würden.



Figur 12: FIXBOX-Anlage zur Aufkonzentration (Destillation) und Zementierung stark radioaktiver Flüssigkeiten: a) Aufgebaute vordere Abschirmwand der FIXBOX-Anlagen; b) Konzept der FIXBOX-Anlage; c) Blick in die Destillationsanlage der FIXBOX.

Um das Verhalten ausgewählter Radionuklide nach der Freisetzung zu untersuchen, wurde das korrodierte Glas als Dünnschliff präpariert und mit energiereichen Röntgenstrahlen an der micro-XAS Strahllinie an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz des PSI untersucht. Diese Strahllinie verfügt über einen scharf fokussierten Röntgenstrahl, der erlaubt Elementverteilungen und Strukturen mit einer Auflösung von wenigen Mikrometern zu wiedergeben. Durch spezielle Mess- und Signalverarbeitungsverfahren ist es sogar möglich, die Verteilung der Oxidationszustände eines einzelnen Elements abzubilden. Fig. 13b zeigt für das untersuchte Glas die räumliche Verteilung der Oxidationsstufen III und IV des Elements Cerium, welches sich chemisch ähnlich wie Plutonium und Uran verhält. Die farbcodierte Darstellung zeigt Ce(IV)-dominierte, violett bis blaue Glaskörner, die vom Korrosionsprozess nicht oder nur wenig angegriffen wurden. Die in den Zwischenräumen auftretende grün bis rote, feine Bereiche, zeigen dagegen eine Anreicherung mit Ce(III). Wie elektronenmikroskopische Aufnahmen gezeigt haben (Fig. 13c), sind diese Bereiche mit sekundären Tonmineralien belegt, die sich im Laufe der Glaskorrosion gebildet haben. Die hier dargestellten Resultate zeigen also, dass das freigesetzte Ce(IV) als Ce(III) in sekundäre Festphasen wieder ausfällt. Dieser Befund ist für das Verständnis chemischer Prozesse im geologischen Tiefenlager besonders wichtig, weil die Löslichkeit, und somit die Mobilität einiger Radionuklide, stark von deren Oxidationszustand abhängen. Ähnlich wie bei Cerium, muss man annehmen, dass Löslichkeit und Beweglichkeit von Plutonium und Uran im Tiefenlager durch Ausfällung- und Reduktionsprozesse limitiert werden.

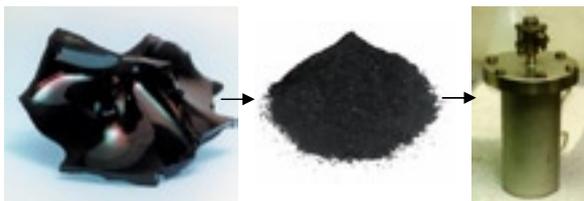


Fig. 13a: Ein Stück Borosilicatglas wurde zermahlen und während 12 Jahren in einem Stahlgefäß mit Wasser bei 90 °C korrodiert. Durch das Zermahlen und die Temperaturerhöhung wird ein Korrosionsfortschritt erreicht, der Zehntausenden von Jahren in einem Tiefenlager für radioaktive Abfälle entspricht.

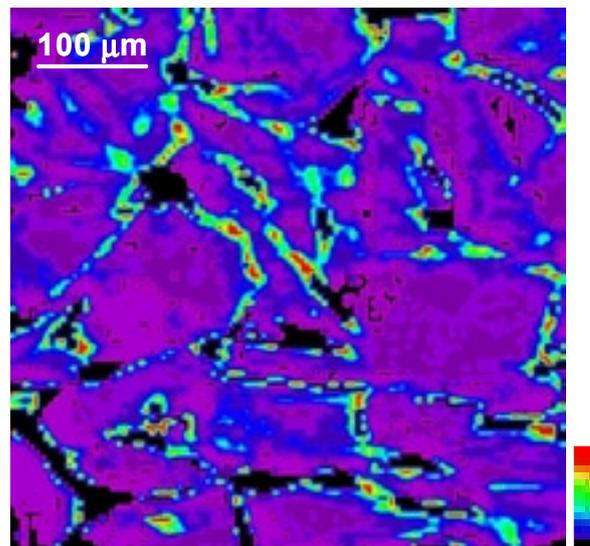


Fig. 13b: Farbkodierte Darstellung des Röntgenfluoreszenzsignals von Ce(IV) (violett bis blau) und Ce(III) (grün bis rot) aus dem korrodierten Glas. Ce(III) reichert sich in Korrosionsprodukten zwischen den Glaskörnern an. Cerium dient in diesem inaktivem Glas als chemisches Analog von Plutonium.

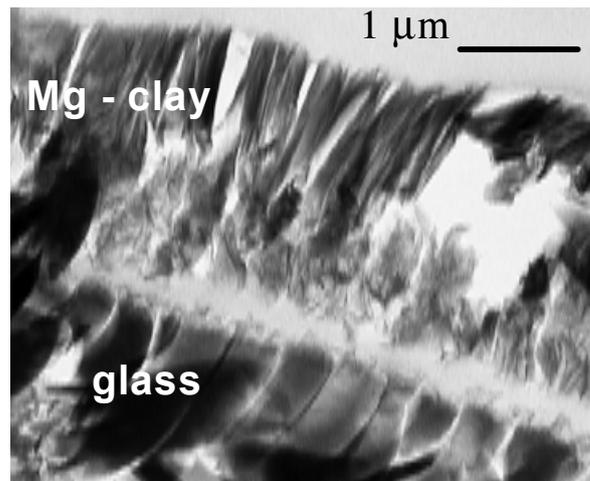


Fig. 13c: Aufnahme eines kleinen Bereichs des korrodierten Glases mit dem Transmissionselektronenmikroskop. Die faserige Festphase (Mg-clay) ist ein Tonmineral, welches sich im Laufe der Korrosion gebildet hat.

Nationale Zusammenarbeit

Wie in den einzelnen Kapiteln erwähnt, werden die Arbeiten je nach Thematik in enger Zusammenarbeit mit den Betreibern der Schweizer Kernkraftwerke, der Elektrizitätswirtschaft und der HSK durchgeführt. Arbeiten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle finden in Zusammenarbeit und mit

Unterstützung der Nagra statt. Es bestehen enge Verbindungen mit den Schweizer Universitäten und den Technischen Hochschulen und Fachhochschulen, allem voran im Rahmen von Dissertationen und Diplomarbeiten.

Internationale Zusammenarbeit

Alle oben aufgeführten Projekte finden im Rahmen intensiver internationaler Zusammenarbeiten statt. Etwa 30 Partner aus 10 Ländern mit Kernenergieprogrammen sowie internationale Organisationen wie die Euratom, die OECD/NEA und die

IAEA umfassen alle wichtigen Forschungsinstitutionen sowie die grössten Hersteller von Nuklearsystemen. Eine detaillierte Auflistung befindet sich auf http://nes.web.psi.ch/int_cooperations.html.

Bewertung 2007 und Ausblick 2008

Die Ziele aller Projekte wurden im Jahr 2007 erfüllt. Besonders hervorzuheben ist die Vereinbarung mehrerer zweijähriger Arbeitsprogramme mit swissnuclear im Rahmen des Vertrags zur Förderung der Kernenergie-Forschung und der Nachwuchsförderung. Sie sichern die Fortführung von Arbeiten u. a. im PROTEUS und zur Weiterentwicklung und Anwendung Reaktorphysikalischer Rechenmethoden, bei Untersuchungen zur Materialalterung und zum Brennstoffverhalten, bei Forschung zu schweren Unfällen und für Grundlagenforschung zur zwei-Phasen-Strömung. Im Rahmen von GIF wurden Verträge auf Projektebene zur Unterschriftsreife gebracht.

Der Antrag an die Sicherheitsbehörden für die Nachrüstung des Nullleistungsreaktors PROTEUS wurde im Frühling 2007 eingereicht. Die Fortsetzung des SETH-Projekts im Rahmen OECD/NEA

wurde durch Unterzeichnung des Vertrags mit den internationalen Partnern gesichert. Innerhalb der Euratom-Programme sind mehrere Beteiligungen durch Unterzeichnung entsprechender Konsortialvereinbarungen vertraglich gesichert. Besonders hervorzuheben ist die Beteiligung an der EU-Kernenergie-Plattform (*Sustainable Nuclear Energy Technology Platform – SNE-TP*).

Zwecks Optimierung der Aktivitäten auf dem Gebiet der Materialforschung bezüglich wissenschaftlicher Dienstleistungen und eigentlicher Forschung, wird im 2008 das bisherige Labor für Nukleare Werkstoffe (LWV) in zwei Einheiten am PSI aufgeteilt: Das Labor für Nukleare Materialien (LNM), in welchem Forschungsarbeiten stattfinden, und die Abteilung Hotlabor (AHL), welche die PSI-Grossanlage Hotlabor mit Ihrer Infrastruktur betreibt.

Liste der F+E-Projekte (JB: Jahresbericht 2007 vorhanden)

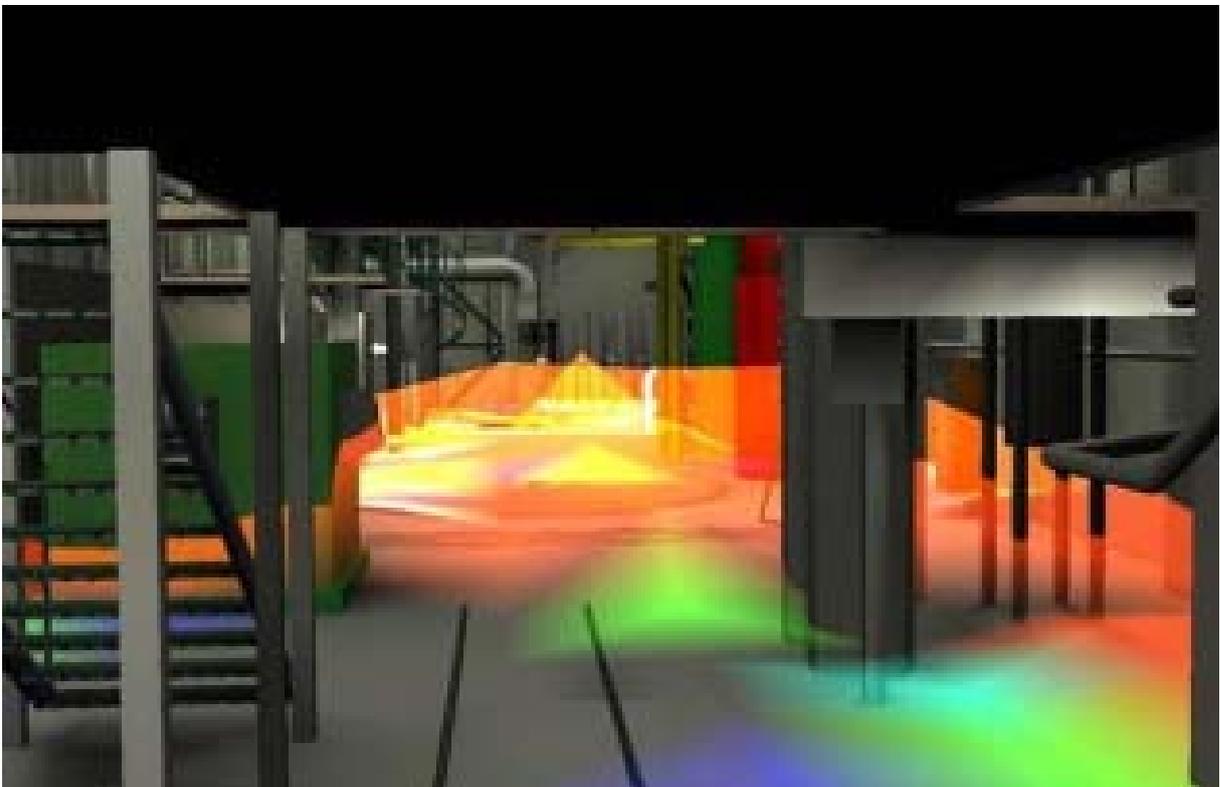
- [1] M. A. Zimmermann, (martin.zimmermann@psi.ch), PSI, Villigen, **STARS**, <http://stars.web.psi.ch>, (JB)
- [2] V. N. Dang (vinh.dang@psi.ch), PSI, Villigen, **HRA**, <http://safe.web.psi.ch/>, (JB)
- [3] M. Murphy, (michael.murphy@psi.ch), PSI, Villigen, **PROTEUS-Experimente**; <http://proteus.web.psi.ch>, (JB)
- [4] J. Bertsch (johannes.bertsch@psi.ch), PSI, Villigen, **CMB**, http://lwv.web.psi.ch/lwv/projects_cms.shtml, (JB)
- [5] H.P. Seifert, (hanspeter.seifert@psi.ch), PSI, Villigen, **INTEGER**, http://lwv.web.psi.ch/lwv/projects_cs.shtml, (JB)
- [6] S. Güntay, (salih.guentay@psi.ch), PSI, Villigen, **Forschung zu schweren Unfällen**, <http://sacre.web.psi.ch>, (JB)
- [7] M. Bradbury (michael.bradbury@psi.ch), PSI, Villigen, Entsorgung radioaktiver Abfälle, <http://les.web.psi.ch/groups/index.html>, (JB)
- [8] W. Hoffelner (wolfgang.hoffelner@psi.ch), PSI, Villigen, **Hochtemperaturmaterialien (HT-MAT)**, http://lwv.web.psi.ch/lwv/projects_htm.shtml, (JB)
- [9] H-M. Prasser (horst-michael.prasser@psi.ch), PSI, Villigen, **ALPHA**, <http://lth.web.psi.ch/LTH.htm>, (JB)
- [10] K. Mikityuk (konstantin.mikityuk@psi.ch), PSI, Villigen, **FAST**, <http://fast.web.psi.ch/>, (JB)
- [11] H. Turton (hal.turton@psi.ch), PSI, Villigen, **Energieökonomie**, <http://energyeconomics.web.psi.ch/>, (JB)
- [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, Villigen, **Mikro-XAS-Beamline**, <http://sls.web.psi.ch/view.php/beamlines/mxas/index.html>

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

PROGRAMM REGULATORISCHE SICHERHEITSFORSCHUNG

Thomas Bigler

Thomas.Bigler@hsk.ch



OECD Halden Reactor Project: Eine Visualisierungstechnologie des Halden Virtual Reality Lab macht Strahlenfelder sichtbar und leistet damit einen Beitrag zur Minimierung der Strahlenbelastung für das Betriebspersonal.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im Rahmen der regulatorischen Sicherheitsforschung vergibt und koordiniert die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) Forschungsaufträge mit dem Ziel, den aktuellen wissenschaftlich-technischen Kenntnisstand zu ermitteln, zu erweitern und für die Aufgaben ihrer Aufsicht verfügbar zu machen. Die von der HSK unterstützten Forschungsprojekte tragen zur Erhaltung und zum Ausbau der hohen Sicherheit der Schweizer Kernanlagen bei. Sie ermöglichen die Identifikation von potenziellen Problembereichen, die Erarbeitung von möglichen Lösungen, die Verringerung von Unsicherheiten und die Verbesserung von Verfahren. Die HSK betreibt zurzeit nationale und internationale Forschungsprojekte in den vier Themenbereichen «Reaktorsicherheit», «Strahlenschutz», «Transport und Entsorgung» sowie «Mensch, Organisation und Sicherheitskultur».

- Im Bereich der Reaktorsicherheit stehen nebst der Materialforschung nach wie vor die Begleitforschung über Stör- und Unfälle zur Weiterentwicklung der deterministischen und probabilistischen Sicherheitsanalysen im Vordergrund. Die von der HSK unterstützten Projekte befassen sich mit dem Risswachstum unter verschiedenen Umgebungsbedingungen, der Materialermüdung und Wechselwirkungen der Kernschmelze mit Wasser und Beton. Zudem beteiligt sich die HSK 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. Dabei spielt präzise Messtechnik eine wichtige Rolle. Die HSK fördert die Weiterentwicklung der Dosimetrie und der Radioanalytik am PSI. Eine grosse Bedeutung hat auch die ständige Verfeinerung der Methodik zur Überwachung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung. Zudem unterstützt die HSK Projekte, welche die Ausbreitung von Radionukliden in Dampferzeugern von Druckwasserreaktoren untersuchen.
- Im Bereich Transport und Entsorgung konzentriert die HSK ihre Forschung zurzeit auf die Untersuchung geeigneter geologischer Schichten für die Endlagerung hochradioaktiver, langlebiger Abfälle. Im Felslabor Mont Terri werden Experimente durchgeführt, um die Eignung des Opalinustons für die geologische Tiefenlagerung zu untersuchen.
- Der Mensch, die Organisation und die Sicherheitskultur haben einen wesentlichen Einfluss auf die Sicherheit einer Kernanlage. Die Wichtigkeit dieser Aspekte wurde in den letzten Jahren erkannt und gewinnt in der Aufsichtstätigkeit zunehmend an Bedeutung. Die Forschungsprojekte der HSK beschäftigen sich unter anderem mit dem Einfluss menschlicher Handlungen in Störfallsituationen und Anforderungsprofilen für das Personal im Kommando- raum von Kernkraftwerken.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

REAKTORSICHERHEIT

KORA – Environmentally-Assisted Cracking in Austenitic LWR Structural Materials [1]: KORA (KORrosionsrisswachstum in Austenitischen Strukturwerkstoffen) ist ein mehrjähriges Forschungsprojekt des Paul Scherrer Institutes (PSI) mit einer Laufzeit vom Januar 2006 bis zum Dezember 2008. KORA beschäftigt sich mit den Schädigungsmechanismen der Spannungsrissskorrosion und der Korrosionsermüdung. Spannungsrissskorrosion kann dann stattfinden, wenn mechanische Belastungen (z. B. Spannungen), eine chemische Umgebung (z. B. heisses Wasser mit Chloriden) und ein bestimmter Werkstoff (z. B. Nickelbasislegierungen) aufeinander treffen und zusammenwirken. In ungünstigen Fällen können dann lange und dünne verzweigte Risse entstehen. Diese sind oft nicht einfach mit dem Auge erkennbar, da kaum Korrosionsprodukte (wie etwa Rost) entstehen. Korrosionsermüdung ist eine weitere, ähnliche Form des umgebungsbedingten Risswachstums, in der die mechanische Belastung zyklisch aufgebracht wird.

Es ist für die Sicherheit der Kernkraftwerke und damit auch für die HSK von grosser Bedeutung zu wissen, welche dieser Belastungs- und Werkstoffkombinationen zu Risswachstum führen könnten. Das KORA Projekt des PSI liefert dazu wertvolle und wichtige Beiträge. Es ist in drei Themenbereiche aufgeteilt: Das Teilprojekt I beschäftigt sich mit der Korrosionsermüdung von austenitisch rostfreien Stählen, das Teilprojekt II mit einer neuen Methode zur Früherkennung von Spannungsrissskorrosion (dem elektrochemischen Rauschen) und das Teilprojekt III mit der Spannungsrissskorrosion in Mischschweissnähten (zwischen Nickelbasiswerkstoffen und niedriglegierten Stählen).

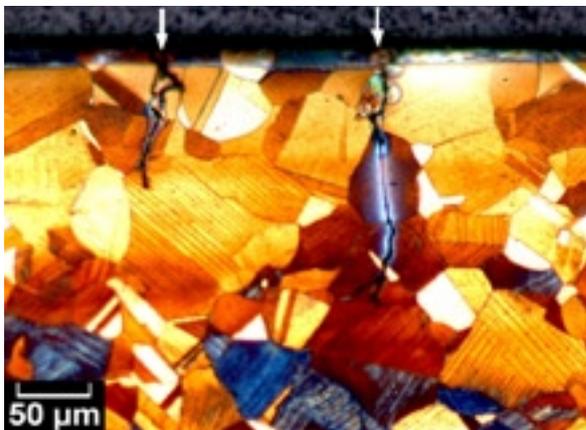
Die Projektziele umfassten in der Berichtsperiode 2007:

- *Teilprojekt I:* Eine Literaturrecherche, die Modifikation zweier bestehender Hochtemperatur-Kreisläufe für Experimente unter Druckwasserreaktorbedingungen sowie erste Experimente zur Korrosionsermüdung;

- *Teilprojekt II:* Eine Literaturrecherche, bei Dauerlast und konstanter Dehngeschwindigkeit durchgeführte Experimente unter Druckwasserreaktorbedingungen und Normalwasserchemie-Fahrweise (NWC), Kalibrierung einer neuen Probengeometrie, die Durchführung eines ECG-COMON Ringversuchs (*European Cooperative Group on Corrosion Monitoring of Nuclear Materials*), den Beginn einer neuen Dissertation (PSI / EMPA) sowie die Organisation eines Workshops am Kongress EUROCORR 2007 der *European Federation of Corrosion*;
- *Teilprojekt III:* Langzeitversuche zur Spannungsrissskorrosion an Alloy 182 Mischnähten unter Siedewasserreaktorbedingungen und Normalwasserchemie-Fahrweise mit Zugabe von Chloriden.

Alle Projektziele wurden erreicht, die Arbeiten schreiten planmässig voran und bis zum Projektende 2008 werden voraussichtlich alle Ziele erreicht werden.

DIAGNOSTIK-II – Monitoring of Thermomechanical Fatigue and RPV Embrittlement due to Neutron Irradiation [2]: Das Projekt hat eine Laufzeit von Januar 2006 bis Dezember 2008 und befasst sich mit der Entwicklung neuer Methoden zur Früherkennung von Werkstoffschäden (Figur 1). Rostfreie Stähle in Kernkraftwerken werden oft zyklisch wechselnden Lasten ausgesetzt, welche diese Werkstoffe altern lassen. Wechsellasten können sowohl mechanischen Ursprungs (z. B. Schwingungen) wie auch thermischen Ursprungs (z. B. Strömungsvermischung von kaltem und heissem Wasser) oder eine Kombination dieser beiden sein. Die Betriebserfahrung zeigt, dass sich dabei unter Umständen Risse bilden können, welche zum Versagen von mechanischen Komponenten führen können. Im Rahmen dieses Projekts wird versucht neue Methoden zu entwickeln, mit denen Ermüdungsschäden besonders früh in austenitisch rostfreien Stählen entdeckt werden können.



Figur 1: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Radialschliffs: Kurze, an der Oberfläche initiierte Risse wachsen ins Zentrum der Probe. (Quelle: PSI)

Reaktordruckbehälterstähle sind oft hoher Neutronenbestrahlung ausgesetzt. Die Neutronen bringen dabei Störungen im Kristallgitter des Stahls ein, welche mit der Zeit und bei hohen Neutronenfluenzen zu einer Versprödung des Reaktordruckbehälterstahls führen können. Das Reaktordruckbehältermaterial darf aber einen gewissen Sprödigkeitsgrad nicht überschreiten, damit ausgeschlossen werden kann, dass kritische Sprödbrüche entstehen. Der Versprödungsgrad des Reaktordruckbehälters wird daher heute mit aufwendigen Methoden überwacht. Seit langem besteht jedoch der Wunsch nach einer einfachen, zuverlässigen und zerstörungsfreien Prüfmethode.

Teilprojekt 1 – Früherkennung der thermomechanischen Ermüdung in austenitisch nichtrostenden Stählen: Die Projektziele 2007 umfassten unter anderem die Evaluation magnetischer und thermoelektrischer Früherkennungsmethoden basierend auf der Initiierung von Mikrorissen, die Weiterentwicklung von Erfolg versprechenden Diagnosemethoden zur Anwendung an ausgetauschten Komponenten, die systematische Untersuchung der thermomechanischen Ermüdung (TMF) unter betriebsnahen Bedingungen, den Beginn einer Doktorarbeit zu mikrostrukturellen Aspekten von TMF, und Simulationsrechnungen zur verformungsinduzierten Martensitbildung und zum Risstiefenwachstum.

Teilprojekt 2 – Bestimmung der RDB-Versprödung auf Grund der Neutronenbestrahlung mittels Seebeck-Koeffizienten: Die Projektziele 2007 umfassten die Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten von bestrahlten, geglühten und wiederbestrahlten Referenzproben (STILO/JRQ) sowie von unterschiedlich bestrahlten Kerbschlagbiegeproben aus den Überwachungsprogrammen von den Kernkraftwerken Gösigen sowie Beznau 1 und 2.

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. Die Neutronenversprödung ist ein bekannter und unvermeidbarer Effekt, dessen Ausmass von verschiedenen Faktoren abhängt (u. a. chemische Zusammensetzung, Bestrahlungstemperatur, Neutronenfluss und Neutronenenergie). Das Vorgehen bei der Überwachung des Bestrahlungsverhaltens von Werkstoffen des RDB ist im kerntechnischen Regelwerk festgelegt. Danach wird die Versprödung der RDB-Werkstoffe aufgrund der Erhöhung der Sprödbruch-Referenztemperatur und der Abnahme der Hochlagenenergie der Kerbschlaggar-

beit-Temperatur-Kurven als Funktion der Neutronenfluenz beurteilt. International wird in den letzten Jahren zunehmend das auf probabilistischer Grundlage basierende Masterkurvenkonzept (MC) nach ASTM E 1921 in Verbindung mit den ASME Code Case N-629 und N-631 angewandt. 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.

Das Forschungsprojekt wurde im April 2007 gestartet. Als Ziele zum Projektstart waren die Probenfertigung, Versuche zur Materialcharakterisierung sowie die Mehrzahl der quasistatischen Versuche zur Bestimmung der Masterkurve und der Risswiderstandskurven vorgesehen. Zur Probenentnahme standen zwei Segmente aus dem RDB des nicht in Betrieb gesetzten deutschen Reaktors Biblis C zur Verfügung. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten und Material zu sparen wurden die Proben so weit wie möglich aus den Bruchstücken der grösseren Proben durch Elektroerosion (EDM) gefertigt. Die Probenherstellung konnte am Jahresende abgeschlossen werden. Zur Materialcharakterisierung wurden die klassischen Zug- und Kerbschlagbiegeversuche bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Die Ergebnisse werden benötigt, um den Temperaturbereich festzulegen, für den nach Standard ASTM E 1921 die Masterkurve bestimmt werden kann, die den Übergangsbereich vom Zähbruch zum Sprödbruch beschreibt. Anschliessend wurden bei quasistatischer Belastung die Masterkurve und die Risswiderstandskurven an den grossen Standardproben bestimmt, die als Referenzkurven für die kleinen Dreipunktbiegeproben (übliche Probenform im Bestrahlungsprogramm RDB) und für die dynamischen Versuche verwendet werden. Damit wurde das Jahresziel erreicht und die Voraussetzung geschaffen, im nächsten Jahr mit verschiedenen Probengrössen bei quasistatischer und dynamischer Belastung zu beginnen.

STARS V – Safety Research in Relation to Transient Analysis for the Reactors in Switzerland [4]: Mit dem Projekt STARS-V wurde im Jahr 2007 die seit 1988 erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen der HSK und dem PSI im Bereich der Sicherheitsanalysen fortgesetzt. Es geht um die Pflege und Weiterentwicklung von Methoden und Rechenprogrammen für die Durchführung von deterministischen Sicherheitsanalysen. Diese schliessen das Anlageverhalten der Sicherheitsebene 1 (Normalbetrieb) bis hin zu auslegungsgrenzüberschreitenden Störfällen (Sicherheitsebene 4 bis zum evtl. Kernschmelzen) ein.

Die Schwerpunkte bei den Projektzielen für das Jahr 2007 wurden wie folgt umgesetzt:

- **Forschungsarbeiten zur Abschätzung von Rechenunsicherheiten:** Im Rahmen des interna-

tionalen Projekts BEMUSE IV (*Best Estimate Methods – Uncertainty and Sensitivity*) wurde von den Projektteilnehmern ein grosser Kühlmittelverluststörfall eines viersträngigen Druckwasserreaktors analysiert. Die Ergebnisse des PSI mit dem Thermohydraulik-Systemcode TRACE lagen im gleichen Bereich wie diejenigen der anderen Projektteilnehmer. Darüber hinaus wurde eine Parameterstudie hinsichtlich der maximalen Hüllrohrtemperatur für diesen Störfall durchgeführt, die den starken Einfluss der thermischen Leitfähigkeit im Brennstab und im Spalt zwischen Brennstoff und Hüllrohr sowie die grosse Bedeutung der Brennstabdimensionierung herausstellten. Im Berichtszeitraum wurde zudem eine Doktorarbeit, die sich mit Unsicherheitsanalysen und ihren Anwendungen in nuklearen Sicherheitsnachweisen beschäftigte, abgeschlossen.

- **Verbesserung der Modellierung des Brennstoff- und Brennstabverhaltens:** Mittels einer Analyse mit dem Brennstoffcode FALCON wurden die Randbedingungen des nächsten Tests zum Brennstoffverhalten bei einem Kühlmittelverluststörfall (IFA-650.7) am Forschungsreaktor in Halden festgelegt. Ziel ist eine maximale Aufweitung des Hüllrohrs zu erreichen um das damit einhergehende Brennstoffverhalten analysieren zu können. FALCON wurde mit einem aktuellen Modell zur Berechnung von Spaltgasfreisetzungen (Freisetzung der bei der Kernspaltung entstehenden gasförmigen Spaltprodukte) verknüpft. Die Nachrechnung eines Versuchs mit hochabgebranntem Brennstoff zeigte eine zufrieden stellende Genauigkeit bei der Bestimmung der Spaltgasfreisetzung. Die Nachrechnung der Simulation eines Reaktivitätsstörfalls an einem Brennstab im Rahmen des internationalen ALPS-Projekts (*Advanced LWR Fuel Performance and Safety Research*) legt nahe, dass der Druckanstieg in intragranularen Blasen kaum Einfluss auf das Hüllrohrversagen hat.
- **TRACE: Analysen und Weiterentwicklungen des Codes:** Die Nachrechnung eines kleinen Kühlmittelverlusts am Versuchsstand ROSA des japanischen Forschungsinstitut JAERI und die Simulation der Ausbreitung von Druckwellen lieferten gute Ergebnisse, zeigten aber auch die Bedeutung einer möglichst detailgetreuen Modellierung. Darüber hinaus wurde ein Modell zur Beschreibung von Filmkondensation validiert und eine neue Wärmeübergangs-Korrelation für konvektives Sieden eingeführt.

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. Neben der HSK fördern als weitere

Partner die schwedische Sicherheitsbehörde (SKI), schwedische Kraftwerksbetreiber sowie die EU (SARNET-Programm) die Projektarbeiten. Seit dem Beginn ihrer Teilnahme am Programm (1996) kann die HSK direkt auf alle erarbeiteten Resultate zugreifen und hat die Möglichkeit, die Forschungsziele mitzubestimmen.

Seit 2006 liegt der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten bei der Untersuchung von Phänomenen, welche bei einem schweren Unfall in einem Siedewasserreaktor (SWR) zu erwarten sind. Die MSWI-Projektarbeiten im Jahre 2007 behandelten sowohl sogenannte «in-vessel»- wie auch «ex-vessel»-Phänomene (d.h. Vorgänge vor, bzw. nach dem Versagen des Reaktordruckbehälters, RDB). Das übergeordnete Projektziel besteht darin, das Verständnis der bei einem Schwerunfall ablaufenden Prozesse zu verbessern. Nachfolgend werden die wichtigsten Projektarbeiten und Resultate aus dem Jahr 2007 kurz zusammengefasst:

Numerische Simulation der Kernschmelze in der unteren Kalotte eines SWR-RDB: Im Rahmen dieser analytischen Untersuchungen konnte ein fortgeschrittenes Simulationsprogramm entwickelt und validiert werden. Das Programm erlaubt die dreidimensionale Berechnung der Ausbildung eines Schmelzesees in der geometrisch (aufgrund zahlreicher Durchdringungen) komplexen unteren SWR-RDB-Kalotte. Der Einfluss der Steuerstabantriebskühlung kann bei der Simulation berücksichtigt werden. Die Resultate der numerischen Simulation zeigen, dass Temperaturverläufe und Wärmestromdichten mit guter Genauigkeit berechnet werden können. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass mit Einsatz der Steuerstabantriebskühlung ein RDB-Versagen möglicherweise verhindert, mindestens aber deutlich verzögert werden kann.

Bildung einer Schmelzpartikelschüttung (DEFOR-Programm): Bei den DEFOR-Experimenten wird die Ausbildung der Schmelzpartikelschüttung untersucht, wenn ein Schmelzestrahle einer unterkühlten Wasservorlage zugeführt wird (Figur 2). Ziel der Experimente ist es, ein verbessertes Verständnis der Thermohydraulik in der Schüttung (Zweiphasenströmung) zu erhalten, um letztendlich bessere Vorhersagen zur Kühlung der Kernschmelze *ex-vessel* zu erhalten.

Die bei der Schmelze-Wasser-Wechselwirkung ablaufenden Prozesse sind hochkomplex: Aufbrechen des Strahls, chemische Reaktionen, Fragmentierung und Erstarrung, Sedimentation, Ausbildung einer losen Schüttung, Schichtung der Schüttung, Partikelagglomeration, Siedevorgänge und Kondensation sowie Austrocknung der Schüttung sind die wesentlichen Phänomene. Bislang wurden untersucht: der Unterkühlungsgrad (Siedeabstand des Wassers), die Tiefe des Wasserpools sowie der Überhitzungsgrad und die Zusammensetzung der Schmelze.

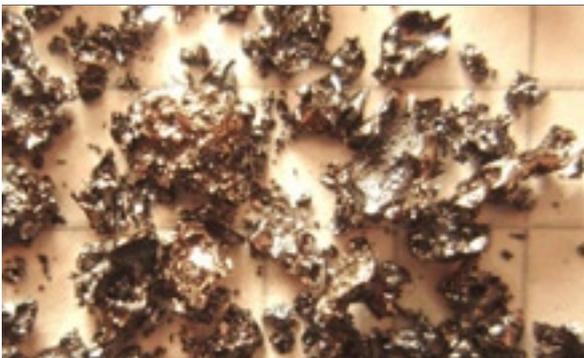
Nachdem die erste Messkampagne gezeigt hat, dass insbesondere der Unterkühlungsgrad des Wassers einen entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des Partikelbetts hat, wurden 2007 sogenannte «Snapshot-Experimente» (d.h. Experimente mit Separation von Teilmechanismen) durchgeführt, bei denen der Einfluss der Unterkühlung unter genau definierten Bedingungen näher untersucht wurde. Wichtige Erkenntnisse aus den Versuchen:

- Bei stark unterkühltem Wasser bildet sich – nach starker Strahlfragmentierung – eine hochporöse Partikelschüttung (60–70%). Die chemische Zusammensetzung der Schmelze hat dabei kaum einen Einfluss auf die Porosität.
- Bei geringer Unterkühlung wird nach Eintritt der Schmelze ein starkes Sieden beobachtet. Die sich ausbildende Schüttung besteht aus stark agglomerierten (d.h. grossen) Partikeln mit einer relativ geringen Porosität im Bereich von 45–59%.

Obleich die teilweise sehr hohen Porositäten auf eine gute Kühlbarkeit der Schüttung hinweisen, ist dieser Sachverhalt zu relativieren: Die Experimente zeigen (leider) auch eine hohe partikelinterne Porosität, welche im Hinblick auf die Kühlungseigenschaften keine Vorteile mit sich bringt.

MELCOR – Überprüfung und Weiterentwicklung des Rechencodes MELCOR für die Analyse schwerer Unfälle in Leichtwasserreaktoren [6]: Der Rechencode MELCOR (*Methods for Estimation of Leakages and Consequences of Releases*) wird sowohl von der HSK wie von den Betreibern schweizerischer Kernkraftwerke für die Berechnung und Simulation von schweren Unfällen benutzt. Der im Auftrag der amerikanischen Aufsichtsbehörde USNRC von Sandia National Laboratories entwickelte Code wird ständig den neusten Erkenntnissen der Unfallforschung angepasst. Die HSK beteiligt sich an diesen Weiterentwicklungsarbeiten. Als sicherheitstechnisch wichtig und für die Analyse schwerer Unfälle besonders relevant wurde die Oxidation von Zircaloyhüllrohren in einer sauerstoffhaltigen Umgebung während eines Unfalls mit schwerer Kernbeschädigung für nähere Untersuchungen ausgewählt. Zircaloy ist die Metalllegierung, aus dem Hüllrohre und Kerneinbauten gefertigt werden. Die im Rahmen dieses Projektes realisierten Weiterentwicklungen sollen später in Form von neuen Programm-Modulen in zukünftige Versionen des MELCOR Rechencodes integriert und damit den Benutzern zur Verfügung gestellt werden.

Im zweiten Projektjahr erarbeitete sich das Projektteam einen breiten Überblick über neue detaillierte Rechnungen zu Einzeleffekt- und Integraltests, die in Forschungsanlagen in Rumä-



Figur 2: Partikelschüttung einer Kernschmelze nach der Abkühlung in Wasser unter verschiedenen Randbedingungen. (Quelle: Royal Institute of Technology KTH)

nien, Deutschland und Frankreich durchgeführt wurden. Daneben wurden Lufteinbruch-Modelle studiert, die durch ausländischen Organisationen (z. B. die deutsche Gesellschaft für Reaktorsicherheit GRS und das französische *Institut de Radio-protection et de Sûreté Nucléaire IRSN*) mithilfe von verschiedenen Computer-Programmen erstellt wurden. Anhand dieser gesammelten Informationen, konnten die wichtigsten physikalischen Mechanismen identifiziert werden. Auf Basis dieser Untersuchungen wurde ein Modell formuliert, das nicht nur das Verhalten von Zirkaloy-4 beschreibt, dem zu betrachtenden Material für dieses Projekt, sondern welches in einem zukünftigen Projekt auch erlaubt das Verhalten von fortschrittlichem Hüllrohrmaterial zu implementieren.

OECD MCCI – Melt Coolability and Concrete Interaction [7]: In diesem Projekt werden am Argonne National Laboratory (ANL) in Chicago

(USA) Versuche zur Kühlbarkeit von Kernschmelze (Corium) und der Wechselwirkung zwischen Kernschmelze und Beton durchgeführt. Bereits abgeschlossen wurde ein Projekt zu Kühlungsmechanismen im Hinblick auf die Entwicklung von Modellierungscodes für schwere Unfälle und die Bewertung und Verbesserung von Codes zur Schmelze-Beton-Wechselwirkung. Die daraus gewonnen Erkenntnisse (z.B. Bedarf an zusätzlichen Daten zur Krustenbildung und zur Betonabtragung) führten 2006 zum Nachfolgeprojekt OECD MCCI 2. Zielsetzung ist die Durchführung und Auswertung von Tests zu folgenden Themen:

- Wechselwirkungen unterschiedlicher Kühlungsmechanismen;
- Verbesserte Kühlbarkeit neuer Designkonzepte unter Kernschmelzbedingungen;
- Generierung zweidimensionaler Daten über Schmelze-Beton-Wechselwirkung;
- Validierung von Codes über schwere Unfälle.

Im Jahr 2007 wurden schwergewichtig folgende Arbeiten durchgeführt:

- Im SSWICS8-Test (*Small Scale Water Ingression and Crust Strength, Test 8*) wurde das Bruchverhalten von zwei 50 mm starken Krustensegmenten untersucht. Hinsichtlich Materialfestigkeiten bestätigten die Ergebnisse Messungen aus früheren Tests (SSWICS 1 bis 7), aus denen gefolgert wurde, dass in der Spätphase des Unfallablaufs mit einer Beeinträchtigung des Mechanismus der Kühlung mittels Wassereintrag (*Water Ingression*) zu rechnen ist.
- Im CCI-Test (*Core-Concrete-Interaction*) wurde ein möglichst hoher Metallgehalt der Schmelze verwendet, um einen prototypischen Siedewasserreaktor besser zu repräsentieren, und der Testbereich wurde modifiziert, um die Phase mit trockener Schmelze-Beton-Wechselwirkung zu verlängern. Die Daten zeigen, dass aufgrund exothermischer Oxidation metallischer Schmelzbestandteile die Temperatur der Schmelze um 150 °C ansteigt und sich die Betonabtragsrate um den Faktor 3 erhöht. Nach vollständiger Oxidation sanken Temperatur und Abtragsrate wieder auf die ursprünglichen Werte. Das Vorhandensein einer Kruste verhinderte den Kontakt von Kühlwasser mit Schmelze (vollständige Blockierung 314 min. nach Testbeginn). Versuche, die Schmelzekruste mit einer Lanze zu durchbrechen, misslangen. Die Krustenbildung liefert zudem eine Erklärung für die asymmetrische Betonabtragung.

OECD OPDE – Piping Failure Data Exchange Project [8]: Die OPDE-Datenbank beinhaltet Informationen von Schadensbefunden an sicher-

heitstechnisch klassierten und risikorelevanten Rohrleitungen in Kernkraftwerken, die zu Wandstärkeschwächungen, Rissen, Leckagen oder Brüchen geführt haben. Die Datenbank bietet den Beteiligten Nutzungsmöglichkeiten für verschiedene Aufgabenstellungen bezüglich der nuklearen Rohrleitungssysteme. Im Vordergrund steht der internationale Erfahrungsaustausch über Ursachen und Auswirkungen von Rohrleitungsschäden.

Bis Mitte 2008 läuft die zweite Phase des OPDE-Projektes, die vor allem der aktiven Datensammlung von Schadensfällen dient. Als praktisches Bewirtschaftungsinstrument steht ein Internet-Portal zur Eingabe neuer Datensätze zur Verfügung, das ausser von den nationalen Koordinatoren der 12 beteiligten Nationen auch von den Betreibern der Kernanlagen genutzt werden kann. In der Datenbank sind derzeit über 4000 Ereignisse dokumentiert. Im Jahr 2007 stand die aktive Bewirtschaftung der Datenbank durch die beteiligten Organisationen im Vordergrund. Es wurden Datensätze aufgearbeitet und neue Datensätze eingefügt. Zwei der vier Schweizer KKW-Betreiber haben 2007 die aktive Bewirtschaftung der Datenbank aufgenommen und nutzen die aktuelle Vollversion. In den Schweizer KKW wurden in den letzten Jahren vergleichsweise wenige Rohrleitungsschäden festgestellt, welche die Aufnahmekriterien für die OPDE-Datenbank erfüllen.

Die HSK organisierte eines der beiden Projekt-treffen mit den nationalen Koordinatoren. Diese Tagung beinhaltete ein Kurzseminar zur Vorstellung und Nutzungsmöglichkeiten der Datenbank, zu dem die Schweizer KKW-Betreiber und weitere Interessierte eingeladen waren. Das zweite Projekt-treffen diente den Vorbereitungen zur Weiterführung der Datenbank für die Phase von 2008 bis 2011. Daneben wurden Fragen des Informationsaustauschs zwischen dem OPDE-Projekt und anderen internationalen Projekten der OECD (*Stress Corrosion Cracking and Cable Ageing Project SCAP*, *Risk-informed, In-service Inspections Methodologies RISMET*) behandelt. Die Bedingungen für die Aufnahme weiterer Mitglieder in das Projekt wurden ausgearbeitet und festgelegt.

OECD ICDE – International Common Cause Failure Data Exchange [9]: Das Projekt wird seit 1998 unter der Aufsicht der OECD *Nuclear Energy Agency* betrieben. Generelles Ziel ist die Förderung des internationalen Erfahrungsaustausches über Ereignisse, bei denen gleichartige Fehler an mindestens zwei (sicherheitsrelevanten) Komponenten gleichzeitig oder innerhalb einer kurzen Zeitspanne aufgrund gemeinsamer Ursache auftraten, so genannte *Common-Cause Failure* (CCF) Ereignisse. Die für die Datenerfassung neu entwickelte ICDE-Datenbank wurde um zusätzliche Funktionen erweitert, um die Verwal-

tung und Auswertung der Datensätze zu erleichtern beziehungsweise besser zu unterstützen. Insgesamt wurde das Ziel eines weitgehend fehlerfreien Betriebs der Datenbank erreicht.

Stand und Erkenntnisse aus der Sammlung und Auswertung von CCF-Ereignissen:

- Die Auswertung der CCF-Ereignisse für den Komponententyp *Füllstandsmessung* wurde mit dem Analysebericht abgeschlossen. Sie zeigt auf, dass Teilausfälle der Füllstandsmessung meistens rechtzeitig entdeckt wurden, bevor die Auslösung einer Sicherheitsfunktion gefährdet war. Allerdings sollte untersucht werden, inwieweit eine durchgängige Prüfung der Funktion der Füllstandsmessung durchgeführt wird bzw. durchführbar ist.
- Die Auswertung der CCF-Ereignisse für den Komponententyp *Leistungsschalter* wurde mit dem Analysebericht abgeschlossen. Als wesentlicher Fehlermechanismus, der zu einem CCF führte, wurde der mechanische Verschleiss einzelner Schalterbauteile identifiziert, der durch unzureichende Wartung und erhöhte Beanspruchungen verursacht wurde.
- Die für den Komponententyp *Steuerstabantriebe* gesammelten CCF-Ereignisse wurden ausgewertet und die Ergebnisse im Rahmen eines Workshops diskutiert. Demnach sind mehrere Ereignisse mit Mehrfachausfällen von Steuerstabantrieben aufgetreten. Diese hätten aber in keinem Fall zu einem Gesamtausfall des Reaktorschnellabschalt-systems geführt.
- Für den neu in die Datensammlung aufgenommenen Komponententyp *Wärmetauscher* wurden von zwei Ländern CCF-Ereignisse zur Überprüfung der Eignung der Kodierungsrichtlinie gesammelt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse (zusätzliche Hinweise zur Kodierung der Ereignisse, Aufnahme zusätzlicher Ausfallarten) gehen in die Richtlinie ein.

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. Das Projekt soll dazu beitragen, die Ursachen, die Ausbreitung und die Auswirkung von Bränden besser zu verstehen. Es ist unter anderem darauf ausgerichtet, die Brandverhütung weiter zu optimieren und die phänomenologische und statistische Basis für probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) von Kernkraftwerken zu verbessern. Die in OECD FIRE entwickelte Datenbank steht nur denjenigen Staaten zur Verfügung, die Daten beisteuern. Zusätzlich zu den elf bisherigen Teilnehmern (Deutschland, Finnland, Frankreich, Japan, Kanada, Niederlande, Schweden, Schweiz, Spanien, Tschechien, USA) ist in 2007 Südkorea dem Projekt beigetreten.

Das im Jahr 2003 gestartete Projekt befindet sich in der zweiten, bis 2009 dauernde Projektphase. Die Anzahl der bislang ausgewerteten Brände (241 qualitätsgesicherte Ereignisse) ist nach wie vor zu klein, um aussagekräftige statistische Schlüsse zu ziehen. Einzelne, zum Teil noch offensichtliche Schlussfolgerungen werden etwa in Bezug auf die häufigsten Brandursachen, die häufigsten Brandlasten oder die Zuverlässigkeit von Brandmeldeanlagen jedoch bereits erkennbar. Über das Projekt und dessen vorläufige Ergebnisse wurde in der Fachzeitschrift *Kerntechnik* sowie an der Konferenz SMiRT 19 in Toronto berichtet.

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. Zu diesem Zweck wird der bisher mit Natrium gekühlte *Testloop* des CABRI-Reaktors auf Wasserkühlung umgebaut, damit die Versuchsanordnung den in Druckwasserreaktoren vorhandenen Betriebs- und Störfallbedingungen besser entspricht. Die Bedingungen für Reaktivitätsstörfälle in Siedewasserreaktoren werden nicht modelliert. 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 2007 wurden folgende Projektziele erreicht:

- Wegen Korrosionsbefunden musste der Kernbehälter des CABRI-Reaktors entfernt werden (Februar 2007). Ein neuer Kernbehälter befindet sich in Fertigung;
- Die Testmatrix wurde überprüft und modifiziert;
- Für die Qualitätstests wurde auch das Brennstabverhalten nach Auftreten der Siedekrise («*post-burn-out*») rechnerisch modelliert;
- Die für einen Test vorgesehenen MOX-Brennstabsegmente aus dem KKW Beznau wurden mit zerstörungsfreien Methoden untersucht;
- Das aus dem KKW Leibstadt stammende bestrahlte Hüllrohrmaterial für mechanische Tests im Rahmen des PROMETRA-Programms wurde am PSI vom Brennstoff getrennt und zusammen mit einem Charakterisierungsbericht an das CEA Saclay geschickt.

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 Betriebser-

fahrungs-Daten von rechnerbasierten Systemen in Kernkraftwerken erstellt. Diese Daten werden nun erweitert und ausgewertet. Das Projekt wird von einer Gruppe von Fachleuten aus den Teilnehmerländern gesteuert.

Folgende zehn Länder waren in den Jahren 2005 – 2007 am COMPSIS-Projekt beteiligt: Finnland, Deutschland, Ungarn, Japan, Südkorea, Slowakei, Schweden, Taiwan, USA und die Schweiz. Im Jahre 2007 wurden die *Coding Guidelines* bereinigt und fertig gestellt. Die Bedürfnisse der einzelnen Länder zur Auswertung der Daten wurden abgeklärt und es wurden mögliche Auswertungsmethoden besprochen. Eine Datenbank mit der Benutzerschnittstelle wurde in Betrieb genommen. Die berechtigten Personen aus den Teilnehmerländern können direkt über eine sichere Internet-Verbindung darauf zugreifen. Es wurden bisher gegen 30 Ereignisse neu eingegeben.

OECD Halden Reactor Project (HRP) [13]: An diesem Project beteiligen sich 18 Länder und mehr als 100 Organisationen, die sich mit Forschung im Bereich der Reaktorsicherheit beschäftigen. Der Forschungsreaktor in Halden, Norwegen, bietet die Möglichkeit, Brennelemente und Materialien unter realistischen Bedingungen zu untersuchen und zwar sowohl unter Normalbedingungen als auch bei simulierten Störfällen. Die Schweiz ist seit 1991 am HRP beteiligt. Mit der Beteiligung am HRP kann die HSK auf aktuelle Forschungs- und Entwicklungsergebnisse im Bereich Brennstoff- und Materialverhalten sowie im Bereich Mensch, Technik und Organisation zurückgreifen. Das HRP liefert einerseits die wissenschaftliche Basis für die Erstellung von Kriterien und Richtlinien auf diesen beiden Gebieten. Andererseits schafft das Projekt eine gemeinsame Plattform für den Informationsaustausch zwischen dem Paul Scherrer Institut (PSI), den Schweizer KKW-Betreibern und der HSK. Über das Schweizer Halden Komitee stellt die HSK den interessierten Schweizer Partnern das Wissen aus dem HRP zur Verfügung und erhebt gleichzeitig deren Bedürfnisse. Diese speist sie über ihre Vertreter in den HRP-Gremien wieder ins Projekt ein.

Bereich Brennstoff- und Materialverhalten (Fuels and Materials): Die Experimente in «*Instrumented Fuel Assemblies*», die in den Forschungsreaktor eingesetzt sind, zielen auf die Messung von Kenngrößen von keramischen Brennstoffen (UO_2 , UO_2 mit Additiven, $(\text{U,Gd})\text{O}_2$, Uran-Plutoniummischoxiden) und von Hüllrohrmaterialien bezüglich ihres Betriebsverhaltens bei hohem Abbrand und unter Störfallbedingungen. Die verschiedenen Bestrahlungstests liefern Daten für die Validierung der Modelle zum thermomechanischen Verhalten von Brennstoff und Brennstäben, die in den Auslegungs- und Modellierungscodes von

Herstellern und Laboratorien benutzt werden. Von speziellem Interesse ist das Experiment mit Uranoxidbrennstoffen mit Additiven bei hoher linearer Stableistung. Das Experiment wurde mit einem klaren Ergebnis bezüglich Spaltgasfreisetzung aus dem Reaktor entladen und wird nun für die Nachbestrahlungsuntersuchungen vorbereitet. Ein weiteres Experiment dieser Art, wiederum mit dem Ziel Daten für die Brennstoffmodellierung bezüglich Spaltgasfreisetzung zu erhalten, wurde initialisiert und soll in 2008 in den Reaktor eingesetzt werden. Das Inertmatrix/MOX-Experiment, für welches das PSI den Brennstoff produziert hat, wurde ausgebaut und zu Untersuchungen in die heißen Zellen gebracht. Die Untersuchungen sind angelaufen und ausgewählte Proben sollen mit speziellen analytischen Instrumenten am PSI charakterisiert werden.

In der viel beachteten Serie von LOCA (*Loss of Coolant Accident*)-Versuchen an Hochabbrandbrennstoffen aus kommerziellen Reaktoren wurden eine Reihe von Tests bei 800 °C und 1050 °C durchgeführt. Die erhaltenen Resultate ergeben noch kein schlüssiges Bild, jedoch wurden wertvolle Daten für die Modellierung erhalten. Die Reihe wird ergänzt mit weiteren Versuchen an Brennstoffsegmenten von Siedewasserreaktoren (Brennstoff aus dem KKL) und Druckwasserreaktoren mit moderatem und hohem Abbrand.

Die Versuche mit Reaktormaterialien gelten vorab der strahlungsinduzierten Spannungsrisskorrosion in normaler und reduzierender Wasserchemie. Interessante Ergebnisse bezüglich strahlungsinduzierten Veränderungen der Eigenschaften wurden für rostfreie Stähle, die für Reaktorstrukturen verwendet werden, erhalten. Der Einfluss einer unterschiedlichen Wasserchemie auf das Risswachstum unter Bestrahlung konnte gezeigt werden. Mit einer Reihe von Versuchen werden die Resultate bei hohen und mittleren akkumulierten Neutronenfluenzen erhärtet.

Entworfen und ausgelegt wurde ein vergleichender Versuch zum Verhalten von kommerziellen Druckwasserreaktor-Hüllrohren unter hohen Lithium-Konzentrationen. Der Versuch ist in den Reaktor eingesetzt. Weitere Themen zu denen neue Experimente vorbereitet wurden, sind Brennstoffkriechen sowie Hüllrohrkriechen und ein Versuch zur Beeinflussung eines Brennstabes mit starker Crud-Belegung. Zudem wurde in Zusammenarbeit mit *Studsvik Nuclear* eine Testeinrichtung für Leistungstranseinten ausgelegt und mit ersten Versuchen validiert.

Direkte Kontakte zwischen dem HRP und dem Kernkraftwerk Leibstadt bestehen nach wie vor bezüglich der gelieferten Brennstoffsegmente für Reaktortests zur Spaltgasfreisetzung, zum so genannten «*Cladding lift-off*» sowie zum Verhalten bei LOCA.

Zwischen dem HRP und dem PSI besteht bei den folgenden drei Versuchen ein gegenseitiges Interesse:

- Detailuntersuchungen des Brennstoffes durch das PSI (SIMS, EPMA);
- Modellierung des Stabverhaltens in den Experimenten durch STARS;
- Korrosionstest von Standard PWR-Hüllrohren (Der Grenzbereich der Korrosionsschicht von Proben aus dem Versuch soll mit einer im PSI entwickelten Technik charakterisiert werden).

Bereich Mensch-Technik-Organisation: Das menschlichen Leistungsvermögen bei der Bedienung komplexer Systeme bildet ein Schwerpunkt der Forschung in Halden. Ergänzend dazu werden Technologien für die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine in Kontrollräumen von Kernkraftwerken erforscht. Experimente im Forschungssimulator bilden die Basis für die Ausarbeitung von Richtlinien und Normen bezüglich der Gestaltung solcher Schnittstellen. Ein Beispiel ist die Entwicklung und das Testen von Fragebögen zur Evaluation der Brauchbarkeit neuer Bedienoberflächen. 2007 wurde eine Pilotstudie für die Beurteilung von Methoden zur menschlicher Zuverlässigkeit (Englisch: HRA) durchgeführt. Dabei wurden die Vorhersagen der HRA-Methoden mit den Leistungen von lizenzierten Operateuren im Simulator des *Man-Machine-Laboratory (Hamm-lab)* verglichen. Das ist Teil eines internationalen Versuchs zur Überprüfung der HRA-Qualität an dem auch die Schweiz (PSI) teilnimmt.

STRAHLENSCHUTZ

Zusammenarbeit in der Strahlenschutzforschung [14]: Ziel ist die Aufrechterhaltung der fachlichen und personellen Kapazitäten, um spezifische Fragestellungen oder Aufgaben in den Gebieten der Dosimetrie, Strahlenmesstechnik und Radioanalytik bearbeiten zu können. Diese können den Normalbetrieb der Kernanlagen betreffen oder im Rahmen der Vorbereitung auf die besonderen Umstände bei Stör- und Unfällen auftreten.

Die internationale Normentätigkeit im Gebiet der Strahlenschutzmesstechnik wird aktiv verfolgt und in ausgewählten Projekten durch direkte Mitarbeit unterstützt. Wesentliche Ziele der Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Radioanalytik sind die weitere Entwicklung, Optimierung und sichere Bereitstellung von spezifischen Analyseverfahren, die im Rahmen von umfassenden Immissions- und Inkorporationsüberwachungen oder im Falle eines nuklearen Ereignisses angewendet werden müssen. Weiteres Ziel der vorliegenden Vereinbarungen ist die Erarbeitung von Expertisen und von Lösungsvorschlägen für dosimetrische, messtechnische und radiologischen Fragen, die

sich der HSK aufgrund ihrer Aufsichtsfunktion über Kernanlagen ergeben.

Im Arbeitsplan 2007 sind nebst der Teilnahme an internationalen Vergleichsmessungen und möglichen Auftragsarbeiten mehrere Teilprojekte vereinbart worden, über die zusammenfassend folgendes zu berichten ist:

In dem von einem Vertreter des PSI geleiteten Verfahrens zur Revision der *Norm über die Bestimmung von Oberflächenkontaminationen (ISO 7503)* einigte sich die Arbeitsgruppe WG 17 in einem Verfahren in einer konzeptuellen Frage. Der Normentwurf unterscheidet auch künftig zwischen der direkten Methode, bei der die Emissionsrate der Oberflächenkontamination bestimmt wird und der indirekten Methode, bei der die Emissionsrate des Wischttestmaterials gemessen wird. Der Normentwurf wird aber die Umrechnung auf Flächenaktivitäten so ausführlich erläutern, dass der Vergleich mit den rechtlich vorgegebenen Richtwerten für die Flächenaktivität geregelt ist.

Neu engagiert sich ein Vertreter des PSI in der ISO-Arbeitsgruppe WG14, die die *Norm über die Beprobung der Fortluft von Kernanlagen (ISO 2889)* komplett revidiert. Durch diese Teilnahme konnten einige Sichtweisen der Schweiz und die Erfahrungen des PSI aus den jüngsten Experimenten einfließen. Das PSI hat die Experimente zur Beprobung von Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von 1 und 8 Mikrometer abgeschlossen und in Berichten dokumentiert. Es zeigte sich, dass die Probenahmeverluste bei den 8 Mikrometer Partikeln in den Kaminen des PSI Ost und West gross sind. Der Entscheid, ob hier Verbesserungsmassnahmen nötig sind, ist nun nicht mehr Gegenstand der Zusammenarbeit. Das Ziel des Teilprojekts «*Entwicklung einer Methode zur Bestimmung von Aerosolverlusten in komplexen Leitungssystemen*» ist zwar terminlich verzögert, aber vollumfänglich erreicht worden. Dieses Teilprojekt ist mit den im 4. Quartal 2007 erstellten Berichten abgeschlossen.

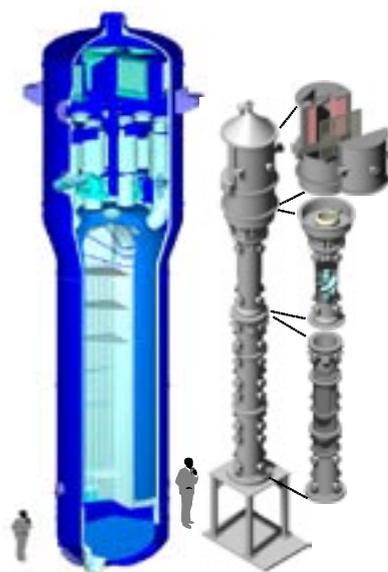
Weit fortgeschritten ist die Entwicklung des Mikrowellen-Aufschlussverfahrens für schwer auflösbare Feststoffe wie Beton, Klärschlamm, Sedimente. Diese neue Aufschlussmethode fand praktische Anwendung bei der Bestimmung der Radioaktivität in Schlämmen, die am PSI Ost als Altlast in einem Rückhaltebecken für Abwasser vorliegen. Ein Chemiestudent der Universität Konstanz hat im Rahmen eines Praktikums die Trennung der Radionuklide Eisen-55, Kobalt-60, Nickel-63 und Chrom-51 über eine spezifische Harz-Kolonie realisiert, so dass künftig in den Aufschlüssen auch die reinen weichen Betastrahler separat nachgewiesen werden können. Zusammen mit den bereits im Vorjahr entwickelten Methode zur Bestimmung des Tritium- und Kohlenstoff-14-Gehalts liegen nun alle Labormethoden zur Spezifi-

zierung der radioaktiven Schlämme vor, so dass ein geeignetes Entsorgungsverfahren evaluiert werden kann.

Das Ziel des Teilprojekts «*Vollständige Beschreibung der Energieabhängigkeit eines Messinstrument-Transfornormals für die Ortsdosisleistung von Umgebungs- und Hochenergiephotonenstrahlung*» ist mit der Etablierung einer bei der PTB Braunschweig kalibrierten Hochdruck-Ionisationskammer vom Typ Reuter&Stockes vollumfänglich erreicht worden. Dieses Teilprojekt kann nach der Fertigstellung der Dokumentation abgeschlossen werden. Es ist geplant die Feldmessungen im Bereich der hochenergetischen N-16-Gammastrahlungsfelder am Zaun der Siedewasserreaktoren fortzuführen.

Artist – Aerosol Trapping in a Steam Generator [15]: KKW-Unfallsequenzen mit Kernschmelzen, *Containment*-Bypasssequenzen, Dampferzeuger-Heizrohrbruch und fehlerhafter Isolation des Dampferzeugers haben nach heutigem Kenntnisstand eine ausserordentliche geringe Eintretenshäufigkeit. Da bei diesem Unfalltyp jedoch radioaktive Stoffe direkt an die Umwelt abgegeben werden können, sind sie für Risikobetrachtungen von Kernkraftwerken trotzdem von grosser Bedeutung. Deshalb ist wichtig zu wissen, welcher Anteil der bei einem Kernschmelzunfall freigesetzten Aerosole auf der Primär- und Sekundärseite des Dampferzeugers zurückgehalten wird. Das Ziel des ARTIST-Projekts ist es deshalb, die Rückhaltungsprozesse im Dampferzeuger genauer zu quantifizieren.

Die ARTIST Untersuchungen werden von einem internationalen Konsortium bestehend aus 12



Figur 3: Schematische Darstellung des KKB Dampferzeugers und der ARTIST Versuchsanlage. (Quelle: PSI)

Organisationen unter der Leitung des PSI durchgeführt und haben zum Ziel, Daten und Informationen über den Aerosoltransport durch die Dampferzeuger bei unterschiedlichen Störfallbedingungen zu erfassen und für die Modellentwicklung aufzubereiten. Die Untersuchungen werden an einem Dampferzeugermodell durchgeführt, das in seiner Grösse und in seinem Aufbau die thermohydraulischen Gegebenheiten der *Framatome* Dampferzeuger widerspiegelt, wie sie auch im KKW Beznau eingesetzt sind (Figur 3). Das ARTIST Versuchsprogramm wurde 2003 gestartet und Ende 2007 abgeschlossen.

Für die folgenden Phasen wurden im Berichtsjahr am PSI Experimente durchgeführt:

Phase I, Abscheidung von Aerosolen in geraden Rohren und in U-Rohren: Es wurden zwei Versuche vorgenommen, in denen der Einfluss der Partikelkonzentration der Aerosole auf den Abscheidungsgrad (Rückhaltung) bei ansonsten gleichen Anfangs- und Randbedingungen studiert wurde.

Phase II, Abscheidung von Aerosolen im Nahbereich des Dampferzeuger-Heizrohrbruches: Es wurden insgesamt vier Versuche durchgeführt, die die Abhängigkeit des Ablagerungsprozesses der eingesetzten Aerosole von der Partikelgrösse untersuchten.

Phase III, Abscheidung von Aerosolen im Fernfeld des Dampferzeuger-Heizrohrbruches: Versuche in der integralen ARTIST Teststrecke hatten gezeigt, dass das Aerosolverhalten im Fernfeld stark von den vorgegebenen Strömungsverhältnissen beeinflusst wird. Deshalb wurden vier Versuche mit einer spezifischen Testeinrichtung für angepasste Strömungsbedingungen im Fernfeld durchgeführt. Dabei wurde sowohl die Partikelgrösse als auch die Durchflussrate des Trägergases variiert und ebenfalls die Wiederholbarkeit der gemessenen Abscheidegrade pro Fernfeldstufe durch zwei Experimente ermittelt.

Phase IV, Abscheidung von Aerosolen im Tropfenabscheider und Dampftrockner: Es wurde ein Versuch durchgeführt, um das Rückhaltevermögen im Tropfenabscheider und Dampftrockner ohne den Einfluss des Rohrbündels zu quantifizieren.

Phase V, Abscheidung von Aerosolen im gefluteten Dampferzeuger: Hierzu wurden im Berichtsjahr keine Untersuchungen vorgenommen.

Phase VI, Abscheidung von Wassertropfen im Tropfenabscheider und Dampftrockner: Eine erste Analyse der Ergebnisse zeigte, dass die effektivste Abscheidung von Aerosolen im Drallkörper des Tropfenabscheiders erfolgt und die Rückhaltung im Dampftrockner im Vergleich dazu verhältnismässig gering ausfällt.

Phase VII, Integraltest: Hierzu wurden im Berichtsjahr keine Untersuchungen vorgenommen.

Parallel zu den Arbeiten an Computermodellen und zu den Experimenten am PSI wurden von den Projekt-Partnern auch entsprechende Modellrechnungen durchgeführt und mit den experimentellen Ergebnissen verglichen. Für die Validierung der eingesetzten Simulations-Software zur Analyse des 3D-Geschwindigkeitsfeldes im Nahbereich der Rohrbruchstelle, insbesondere zur Modellierung des Abscheidungsprozesses an der Bruchstelle (Phase II), wurde eine experimentelle Datenbasis erstellt.

Die HSK kommt zum Schluss, dass die Projektziele für das Jahr 2007 erreicht wurden.

TRANSPORT UND ENTSORGUNG

MONT TERRI – EZ-B: Mechanical Heterogeneities and Fracture Generation in the Excavated Disturbed Zone (EDZ) [16]: Das Forschungsprojekt im Felslabor Mont-Terri unter dem Patronat der Landesgeologie (swisstopo) hat zum Ziel, die geologischen, hydrogeologischen, geochemischen und felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustones zu untersuchen. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse kann die Sicherheit und die bautechnische Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für radioaktive Abfälle in diesem Gestein beurteilt werden. Am Forschungsprojekt beteiligen sich heute 12 Organisationen aus 6 Ländern (Schweiz, Frankreich, Deutschland, Spanien, Belgien und Japan). Gegenwärtig laufen 31 Experimente, wobei die HSK das EZ-B Experiment finanziert und begleitet. Dieses Experiment hat zum Ziel, die durch den Stollenbau verursachten Veränderungen im Tongestein zu erfassen. Im Mittelpunkt steht dabei die Charakterisierung der Klüfte in der Auflockerungszone, die beim Ausbruch des Stollens infolge der Spannungsumlagerungen entstehen. Mit dem EZ-B Experiment sollen die Mechanismen der Klüftbildung analysiert und mit numerischen Modellsimulationen verglichen werden.

Die wichtigsten Ergebnisse des EZ-B Experimentes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Einfluss tektonischer Strukturen auf die EDZ-Klüftbildung:** Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass kleine, bereits vorhandene tektonische Scherflächen die Bildung der Klüfte in der Auflockerungszone beeinflussen haben und für Ort und Form der Klüfte massgebend sind. Die Ergebnisse lassen auf eine Mobilisierung der tektonischen Strukturen schliessen, die bei der Spannungsumlagerung während des Ausbruchs als bevorzugte Schwächezonen wirkten.
- **Ausdehnung der Auflockerungszone:** Die durch den Bau des EZ-B Teststollens (Durchmesser 3.8 m, Länge 6.50 m) verursachte Auflockerungszone um den Stollen herum ist he-

terogen ausgebildet und hat eine Ausdehnung von 0.2 bis 0.6 m, an der Stollenbrust von 0.3 bis maximal 1.6 m. Die Entwicklung der Klüfte in der Auflockerungszone erweist sich dabei als komplexer Vorgang, der von den lokalen Spannungsverhältnissen und der Anisotropie des Gebirges (Schichtung und tektonische Strukturen) beeinflusst wird.

- *Ausbildungsform der EDZ-Klüfte:* In der Auflockerungszone um den Teststollen sind EDZ-Klüfte makroskopisch nur in unmittelbarer Umgebung des Stollens (in der Regel bis 20 cm, maximal bis 55 cm) erkennbar. Im äusseren Bereich der Auflockerungszone (typischerweise 50 – 60 cm, maximal bis 160 cm) lassen sich Veränderungen im Gestein nur geophysikalisch anhand der reduzierten seismischen Wellengeschwindigkeiten sichtbar machen. Diese Veränderungen werden als Mikrorisse interpretiert.
- *Gebirgseigenschaften des Opalinustons:* Die Untersuchungen zur Entstehung der Auflockerungszone und dem Bildungsprozess der EDZ-Klüfte haben zu einem besseren Verständnis der mechanischen Gebirgseigenschaften des Opalinustons geführt. Die Untersuchungen deuten darauf hin, dass im Felslabor Mont Terri die tektonischen Scherzonen für das mechanische Gebirgsverhalten eine noch wichtigere Rolle spielen als die Gesteinsanisotropie. Diese tektonischen Heterogenitäten wurden in bisherigen Modellansätzen zur Gebirgscharakterisierung nicht berücksichtigt, entsprechend unsicher sind heute ihre mechanischen Parameter.
- *Bruchkriterien des Opalinustons:* Die beobachtete Art und die Orte des Auftretens von makroskopischen und mikroskopischen EDZ-Klüften können unter Berücksichtigung eines neuen Bruchkriteriums und aufgrund von relativ einfachen elastischen 3-dimensionalen Modellansätzen in den meisten Fällen gut reproduziert werden. Das Bruchkriterium basiert auf der räumlich-zeitlichen Entwicklung des Verhältnisses der maximalen zur minimalen Hauptspannung. Unter Berücksichtigung der tektonischen Strukturen (Scherflächen), die als Schwächezonen wirken, können Ort und Ausdehnung der EDZ-Klüfte mit diesem Modellansatz relativ gut vorhergesagt werden.

Mit dem Mont Terri Forschungsprojekt werden wichtige Grundlagendaten für die Beurteilung der Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers im Opalinuston gewonnen. Im Rahmen der Überprüfung des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston hat die HSK den Einfluss der Auflockerungszone auf die Sicherheit des Tiefenlagers anhand von Modellrechnungen untersucht (HSK 35/95 und HSK 35/99). Die vorliegenden Befunde des EZ-B Experimentes bestätigen, dass die da-

maligen konzeptuellen Annahmen der HSK über die Ausdehnung der Auflockerungszone konservativ gewählt waren. Aufgrund der sehr niedrigen hydraulischen Durchlässigkeiten und dem hohen Sorptionsvermögen stellt der Opalinuston eine geeignete Wirtgesteinsoption für die geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle dar.

MENSCH, ORGANISATION UND SICHERHEITSKULTUR

HRA – Human Reliability Analysis [17]: 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 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 Störfalles gefordert sind, aber unterlassen werden. Hingegen fehlt eine effiziente Methode zur systematischen Identifizierung und Quantifizierung von ungeplanten, menschlichen Handlungen, welche den Verlauf eines Störfalles negativ beeinflussen – den so genannten EOC («*Errors of Commission*»). Hier setzt das vom PSI durchgeführte Forschungsprojekt an, das folgende Punkte beinhaltet:

- Methodenentwicklung zur systematischen Identifizierung und Quantifizierung von EOC sowie Anwendung der Methode für ein Schweizer Kernkraftwerk;
- Entwicklung dynamischer Modelle, welche die Interaktionen zwischen Mensch und Anlage abbilden, um die HRA zu unterstützen.

Die Projektziele und deren Umsetzung für das Jahr 2007 lassen sich wie folgt charakterisieren:

- *Errors of Commission:* Die vom PSI zur Identifizierung und Quantifizierung von EOC entwickelte Methode CESA («*Commission Errors Search and Assessment*») wurde im Berichtsjahr weiter verfeinert, überprüft und dokumentiert. Dazu beteiligt sich das PSI – im Rahmen des OECD *Halden Reactor Project* – am Teilprojekt «*Empirical Testing of HRA Methods*». Diese internationale Aktivität dient primär einer Standortbestimmung zur Qualität der verschiedenen HRA-Methoden. Anhand von Simulatordaten wird unter anderem geprüft, ob die bekannten HRA-Methoden die relevanten Einflussfaktoren für die Zuverlässigkeit von Operateurhandlungen richtig vorhersagen und bewerten. Im Jahr 2007 wurden für zwei Szenarien Simulatordaten erhoben. Unabhängig davon wurden diese Szenarien mit verschiedenen HRA-Methoden bewertet. Eine erste Auswertung der Daten zeigt gute Ergebnisse

für die CESA-Methode. Diese Auswertung soll nächstes Jahr abgeschlossen werden. Die Methode wurde vom PSI international publiziert und ein Handbuch zur *Identifizierung* von EOC mit Hilfe von CESA wurde erstellt. Ein Handbuch zur *Quantifizierung* von EOC auf Basis von CESA liegt im Entwurf vor.

- *Dynamische Modelle*: Mit dynamischen Modellen für das Anlagen- und Personalverhalten soll die HRA unterstützt werden. Dadurch werden insbesondere die Modellierungsgrundlagen für die Diagnoseprozesse der Operateure verbessert. Da im Modell die entsprechenden Vorschriften abgebildet werden, kann die Software selber Szenarien entwickeln, die auch EOC beinhalten. Zur genaueren Abbildung des dynamischen Verhaltens Mensch-Anlage wurde im Berichtsjahr die bestehende Software für die dynamische Ereignisablaufanalyse mit einem thermohydraulischen Programm (RELAP 5) verbunden. Für letzteres existiert bereits ein werkspezifisches Modell für eines der Schweizer Kernkraftwerke.

Anforderungsanalyse für das Personal in Schweizer KKW [18]: Die Aufgaben des Schichtpersonals (Schichtchef, Reaktoroperateure, Piktett-Ingenieur) im Kommandoraum eines Kernkraftwerks verlangen von den verschiedenen Personengruppen ihrer Tätigkeit angepasste Persönlichkeitsmerkmale. Diese Merkmale wurden bei der Inbetriebnahme der ersten Kernkraftwerke in der Schweiz von den Betreibern festgelegt. Ende der achtziger Jahre hat das Institut für Angewandte Psychologie IAP (Heute «Hochschule für Angewandte Psychologie HAP») in Zürich im Auf-

trag der HSK diesen Anforderungskatalog überarbeitet. In der Zwischenzeit haben sich die Anforderungen an alle genannten Personenkreise durch Veränderungen am Arbeitsplatz (Anlagenänderungen, Einsatz von computergesteuerten Operateurhilfsmitteln, usw.) erweitert und bedürfen einer eingehenden Überarbeitung. In diesem Zusammenhang 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.

Der Lehrstuhl für Arbeits- und Organisationspsychologie der Universität Zürich befasst sich unter anderem intensiv mit dem Thema Eignungsdiagnostik. Es wird die genannten Fragestellungen in einem Forschungsprojekt bearbeiten.

Die im Jahr 2006 begonnene Datenerhebung zur Bestimmung der Anforderungsprofile wurde im Berichtsjahr anhand des «*Fleishman Job Analysis Survey*» abgeschlossen. Alle schweizerischen Kernkraftwerke haben mit grossem Engagement an der Datenerfassung mitgewirkt. Mit dem gewonnenen Material wurden erste Anforderungsprofile für die einzelnen Funktionsgruppen des zulassungspflichtigen Personals erstellt. Erstaunlich an den Resultaten (Struktur der Profile) ist deren starke Homogenität zwischen den einzelnen Werken, während sich zwischen den verschiedenen Funktionen des zulassungspflichtigen Personals doch signifikante Unterschiede zeigen.

Nationale Zusammenarbeit

Innerhalb der Schweiz haben die Institute, welche die Forschungsarbeiten ausführten effizient und kooperativ zusammengearbeitet. Regelmässige Gespräche mit der HSK ermöglichten eine Ausrichtung der Fachinhalte entsprechend der aktuellen Bedürfnisse, wobei auch ausführlich über die Umsetzung der Resultate in die schweizerische

Sicherheits- und Aufsichtspraxis diskutiert wurde. 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 2007 und Ausblick 2008

Die Projekte konnten im Berichtsjahr planmässig abgewickelt werden. Sie lieferten wichtige wissenschaftliche Grundlagen, welche direkt oder indirekt in die Aufsichtstätigkeit der HSK einfließen werden. Der Transfer der wissenschaftlichen Ergebnisse in die operativen Bereiche der HSK und umgekehrt erfolgt dank der guten Arbeitsbeziehungen mit den Projektleitern und ihren Teams reibungslos. Der Kompetenzerhalt und -ausbau

innerhalb der Aufsichtsbehörde sowie die Bereitstellung von interessanten Forschungsthemen für die Wissenschaftler sind somit gewährleistet. Die Forschungsprojekte, welche im Jahr 2008 gestartet werden, orientieren sich inhaltlich ebenfalls an den einleitend beschriebenen Schwerpunkten. Grösstenteils handelt es sich dabei um Nachfolgeprojekte der im Berichtsjahr abgeschlossenen Aktivitäten.

Liste der F+E-Projekte

Jahresberichte (JB), Berichte und Referenzen zu allen Projekten sowie weitere Informationen finden sich im *Erfahrungs- und Forschungsbericht 2007* der HSK, der im Dokumentenarchiv unter <http://www.hsk.ch> erhältlich ist oder als Druckversion beim Infodienst unter derselben Adresse bezogen werden kann.

- [1] H.P. Seifert, S. Ritter, 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, (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, 01314 Dresden, Deutschland: **Bruchmechanische Werkstoffcharakterisierung zur Überwachung der Neutronenversprödung von Reaktor-druckbehältern** (JB)
- [4] M.A. Zimmermann, (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 LWR** (JB)
- [6] T. Haste, J. Birchley, (tim.haste@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI: **MELCOR – Überprüfung und Weiterentwicklung des Rechencodes MELCOR für die Analyse schwerer Unfälle in Leichtwasserreaktoren** (JB)
- [7] B. Reer, (Bernhard.Reer@hsk.ch), HSK, 5232 Villigen: **Bewertung des Projekts OECD MCCI – Melt Coolability and Concrete Interaction** (JB)
- [8] S. Schulz, (Susanne.Schulz@hsk.ch), Bewertung des Projekts **OECD OPDE – Piping Failure Data Exchange Project** (JB)
- [9] K. Theiss, (Klaus.Theiss@hsk.ch), Bewertung des Projekts **OECD ICDE – Common Cause Failure Data Exchange** (JB)
- [10] S. Brosi, (Stefan.Brosi@hsk.ch), Bewertung des Projekts **OECD FIRE – Fire Incident Record Exchange** (JB)
- [11] H. Wand, (Hartmut.Wand@hsk.ch), Bewertung des Projekts **OECD CABRI Waterloo Project** (JB)
- [12] U. Meyer, (Ulrich.Meyer@hsk.ch), 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, NO-1751, Halden, Norway: **OECD Halden Reactor Project: Fuels and Materials / Man, Technology, Organisation** (JB)
- [14] J. Eikenberg, M. Jäggi, (jost.eikenberg@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen: **Zusammenarbeit in der Strahlungsforschung** (JB)
- [15] S. Güntay, (salih.guentay@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI: **ARTIST – Aerosol Trapping in a Steam Generator** (JB)
- [16] S. Löw, S. Yong, C. Fidelibus, (loew@erdw.ethz.ch), Chair for Engineering Geology, ETH-Zürich, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich: **Mont Terri – EZ-B: Mechanical Heterogeneities and Fracture Generation in the EDZ** (JB)
- [17] V.N. Dang, (vinh.dang@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI: **Human Reliability Analysis (HRA)** (JB)
- [18] S. Schumacher, M. Kleinmann, Universität Zürich, Psychologisches Institut, Arbeits- und Organisationspsychologie, 8050 Zürich: **Anforderungsanalyse für das Personal in Schweizer KKW** (JB)

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

PROGRAMME FUSION THERMONUCLÉAIRE CONTRÔLÉE

Andreas Werthmueller et al.
andreas.werthmueller@sbf.admin.ch



L'intérieur du *Tokamak à Configuration Variable TCV*, tel qu'il se présentait le 22 mars 2007, juste à la veille de sa remise en chantier pour d'importantes modifications (photographie prise par Alain Herzog, ©EPFL).

Centres de gravité du programme

Die Kernfusion verspricht eine sichere, umweltfreundliche, ergiebige und über mehrere Jahrhunderte unerschöpfliche Energiequelle, zum Beispiel, zur Stromerzeugung zu werden. Des Weiteren und im Gegensatz zu den heutigen fossilen aber auch nuklearen Brennstoffen wird sie unabhängig von geopolitischen Rahmenbedingungen funktionieren und im Sinne der Proliferation um einiges unproblematischer sein als die Fission. Diese Eigenschaften sind es, welche die internationale Gemeinschaft seit nunmehr bald 50 Jahren antreibt, die physikalischen und technischen Hindernisse auf dem Weg zur Realisierung eines Fusionskraftwerkes zu lösen. Obwohl das Ziel noch nicht erreicht ist, muss der bisherige Leistungsausweis der Fusionsforschung als beachtlich bezeichnet werden: die Fusionsforschung hat in den vergangenen 40 Jahren eine schnellere Entwicklung durchlaufen als die Halbleitertechnologie (*Recherche énergétique – Energie-Forschung 2005*, BFE, S. 183). Ausserdem sind aus der Fusionsforschung etliche Verfahren und technische Anwendungen abgeleitet worden, welche in vielen praktischen Anwendungen heute den Stand der Technik darstellen, und zwar von der Materialbearbeitung über Anwendungsprodukte bis hin zu Planungs- und Entwicklungsprozessen.

Bereits in den 1970er-Jahren strebte die Schweiz im Bereich der Fusionsenergie eine Forschungskooperation mit der Europäischen Atomgemeinschaft EURATOM an. Mit dem Kooperationsabkommen aus dem Jahre 1978 fand schliess-

lich die Anbindung an die europäische Fusionsforschung statt. In diesem Rahmen konnte sich die Schweiz unter anderem am Bau und Betrieb des gemeinsamen europäischen Reaktors *JET* («*Joint European Torus*», www.jet.efda.org) beteiligen. Diese Möglichkeit war aufgrund der damals vorhandenen, exzellenten Industriekompetenz auch für die Wirtschaft von grossem Nutzen. Die sehr zufriedenstellende Kooperation mit EURATOM erlaubte es der Schweiz, in wichtigen Bereichen eine Schlüsselposition aufzubauen. Dies beinhaltet auch einige für das europäische Fusionsprogramm bedeutende Infrastrukturen in unserem Land, z.B. der im CRPP [1] an der ETH Lausanne stehende *TCV* («*Tokamak à configuration variable*») oder die Anlage zur Erforschung und Qualitätsprüfung von supraleitenden Kabeln *SULTAN* (Supraleiter Testanlage) des Paul Scherrer Instituts. Beide Zentren haben sich – zusammen mit der Universität Basel [2] – mit Erfolg an der internationalen Fusionsforschung beteiligt und sind heute wichtige Standbeine der europäischen Fusionsforschung.

Le CRPP travaille dans la modélisation théorique et expérimentale du plasma, le chauffage du plasma, la supraconductivité et dans la recherche des matériaux. Aussi dans le domaine des matériaux, c'est l'Institut de physique de l'Université de Bâle qui développe des connaissances importantes pour les techniques de mesures et de réglages de futurs réacteurs de fusion.

Travaux effectués et résultats acquis pour 2007

L'essentiel en bref...

- 23. März 2007: Gründung des europäischen Gemeinsamen Unternehmens (GU) für den *ITER* und die Entwicklung der Fusionsenergie [3]. Das Gemeinsame Unternehmen wird als «*domestic agency*» den europäischen Beitrag für das *ITER*-Projekt koordinieren und verwalten.
- 28. Juni 2007: Konstituierende Sitzung des Führungsorgans des Gemeinsamen Unternehmens mit gleichzeitiger Unterzeichnung des Sitzstaatabkommens für das GU mit Spanien.
- Sommer 2007: Die Informationsplattform *iter-industry.ch* [4] wurde überarbeitet und präsentiert sich nun als Eingangspforte für Interessierte rund um die europäische Fusionsforschung und das Projekt *ITER*. In erster Linie vernetzt die Plattform Stellenangebote der europäischen und internationalen Fusionsforschung sowie Ausschreibungen im Rahmen des *ITER* Beschaffungswesens.
- 28. September 2007: Entscheid des Bundesrates zum Beitritt der Schweiz in das Gemeinsame Unternehmen GU. Dieser vorläufige Beitritt erlaubt der Schweiz das volle Mitspracherecht bereits jetzt, d.h. bevor der innerstaatliche Entscheidungsprozess mit der Genehmigung durch das Parlament abgeschlossen ist.
- Herbst 2007: Der Direktor des CRPP wird als Vorsitzender in das «*Technical Advisory Panel*» des europäischen Gemeinsamen Unternehmens «*Fusion for Energy*» berufen. Ein weiterer Schweizer wird *ad personam* vom Vorstand des Gemeinsamen Unternehmens als Mitglied des *Executive Committee* des GU nominiert.
- Décembre 2007 : la Confédération prolonge les quatre *Accords d'exécution* dans le cadre de la coopération avec EURATOM : le *Contrat d'Association*, qui est un contrat bilatéral entre la Suisse et EURATOM, et le *European Fusion Development Agreement* (EFDA) [5], qui est

un accord multilatéral entre les pays membres d'EURATOM et la Suisse, ont été prolongés jusqu'au 31 décembre 2013. Le *JET Implementing Agreement*, qui est un accord qui règle la participation au *Joint European Torus JET*, a été prolongé jusqu'à fin 2010, alors que le *Contrat de Mobilité* a été prolongé pour un an.

International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)

Das Projekt *ITER* [6] soll bis spätestens 2030 die technische Machbarkeit eines Fusionskraftwerkes aufzeigen und wird von einem weltweiten Staatenverbund, mit EURATOM, der Russischen Föderation, der Volksrepublik China, Japan, der Republik Korea, der Republik Indien und den Vereinigten Staaten von Amerika, getragen. Für die Realisierung des in Cadarache (Südfrankreich) angesiedelten Versuchsreaktors sind Investitionskosten in der Höhe von ca. 5 Mrd. Euro vorgesehen. Die Betriebsaufnahme soll bis 2020 erfolgt sein. Für die auf mindestens 25 Jahre geplante Betriebsphase des *ITER* Reaktors sind für die Planungsphase weitere rund 5 Mrd. Euro veranschlagt. Vu que le *JET* est fondé sur le même principe de confinement du plasma qu'*ITER*, il a servi et servira encore de véritable banc d'essai pour les technologies d'*ITER*.

Am 21. November 2006 wurde das Übereinkommen zur Gründung der *ITER*-Organisation in Paris unterzeichnet. In der Zwischenzeit hat Frankreich in seiner Eigenschaft als Sitzstaat der Organisation und des Reaktors die wichtigsten Vorarbeiten für den eigentlichen Baubeginn vorangetrieben. Parallel dazu wurde das Management der *ITER*-Organisation bestimmt und mit der Rekrutierung von Personal begonnen. Bereits im Sommer 2007 hat die *ITER*-Organisation die ersten Schritte im Bereich der Beschaffungen unternommen. Damit wurde auch der Startschuss für die konkrete Auftragsvergabe gegeben, in deren Folge sich auch die Industrie am Projekt beteiligen wird. En parallèle avec le projet *ITER*, l'UE et le Japon ont signé le 24 février 2007 un accord visant le développement accéléré de l'énergie de fusion. Les projets de ce programme seront entièrement gérés par des équipes européennes et japonaises. Le programme permettra, entre autres, une exploitation efficace d'*ITER* basée sur des expériences préparatoires sur des machines «satellites», comme le *Joint European Torus JET* [7] ou un nouveau *tokamak* japonais (appelé provisoirement *NCT*). Il comprend aussi des projets développant la science et la technologie des matériaux, ce qui représente un maillon élémentaire d'un réacteur de fusion. Dans ce cadre, une installation d'irradiation avec un faisceau intense de neutrons à 14 MeV, soit l'*International Fusion Material Irradiation Facility (IFMIF)* devra jouer un rôle crucial. En effet, la conviction est maintenant générale que cette dernière est

aussi indispensable qu'*ITER* sur la voie de la domestication de la fusion. Avec la participation de la Suisse, l'UE et le Japon vont mettre en œuvre un programme de recherche et développement axé sur *IFMIF*, visant à développer l'accélérateur, la cible de lithium et la cellule d'irradiation. Finalement, un centre de recherche sera établi au Japon pour permettre diverses activités communes, comme, par exemple, la simulation numérique. Le fruit de ce programme, appelé l'approche élargie ou «*Broader Approach*», devra permettre la construction d'un réacteur de démonstration vers 2040 ou avant ; ce futur réacteur, dénommé *DEMO*, sera conçu pour produire de l'électricité afin de valider le concept sous contraintes économiques.

Coopération européenne dans le cadre d'EURATOM

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. 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*, de même que la participation européenne à *ITER* [4]. 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 7^e 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*», simplement dit : «*Joint Undertaking Fusion for Energy*», d'où dérive le sigle utilisé).

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 européen. Ces contrats ont été renouvelés en 2007 pour des durées de un à six ans.

En plus de sa contribution annuelle au Programme-cadre d'EURATOM, qui a été de 3'242'549 € en 2007, la Suisse a participé en 2007 avec un versement de 495'079 € au *JET Joint Fund* (un fonds commun pour l'exploitation du *JET* prévue aux termes du *JET IA*). Ces contributions ont été couvertes par les crédits, ouverts par le Parlement suisse pour financer les participations suisses au 7^e PCRD de l'UE, crédits gérés par le Secrétariat d'État à l'Éducation et à la Recherche SER.

Le CRPP : l'Association Suisse/EURATOM

Comme par le passé, le CRPP a continué en 2007 à être étroitement associé à toutes les activités d'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 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*, voir la figure de titre et la figure 1) reste le «navire amiral» des installations exploitées par le CRPP à l'EPFL de Lausanne. Cette installation, la plus grande de l'EPFL, présente deux propriétés uniques au monde : l'installation produit des 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 ; la densité de puissance hyper-fréquence représente toujours un record mondial. C'est dans ces deux contextes que les recherches sur le *TCV* se poursuivent. Une grande série de modifications importantes ont été planifiées pour 2007 et l'opération expérimentale a été interrompue en mars 2007, pour reprendre en 2008. L'accent en 2007 a donc été porté sur l'exploitation des données résultant d'une opération intense avant ces mises à jour techniques.



Figure 1 : le TCV vu de plain-pied (photo EPFL)

Un défi majeur dans le domaine de l'opération des *tokamaks* reste la création de plasmas dans lesquels le courant électrique est entraîné par un effet fin, le «*bootstrap current*». Même si une bonne fraction du courant entraîné par cet effet a été observée, un courant de 55 kA a été soutenu dans le *TCV* pendant une seconde avec la présence de 2.7 MW de puissance hyper-fréquence.

Un deuxième point fort en 2007 a été la reconnaissance des contributions du *TCV* aux phénomènes qui provoquent une rotation du plasma. Cette rotation est normalement observée en présence de fort torque sur le plasma. Or, dans le *TCV*, ce torque est nul et le plasma tourne quand même. Deux conférences invitées en 2007 ont souligné l'importance de ces travaux.

Le groupe de théorie concentre ses études sur plusieurs domaines d'excellence : la théorie et la modélisation numérique portent sur des simulations *ab initio* de turbulence, de la stabilité MHD (magnéto-hydro-dynamique) d'un *tokamak*, et du transport de chaleur dans le plasma chaud. Ces travaux sur le transport combinent une approche numérique, pour réduire le bruit statistique dans les simulations, et une approche physique, pour déterminer l'importance des différents phénomènes dans le plasma. L'application des ondes radio-fréquences aux *tokamaks* et *stellarateurs*, ainsi que la caractérisation 3D des configurations à confinement magnétique ont été poursuivies, aussi bien que les simulations des plasmas du *TCV* et d'*ITER*.

La machine *TORPEX* offre l'avantage de mesures détaillées à l'intérieur du plasma et au bord du plasma. Les résultats les plus importants en 2007 concernent le transport d'énergie et de particules par des petites zones très localisées, appelées «*blobs*», qui sont des structures isolées créant un fort transport de petits volumes. Un mécanisme similaire contribue certainement au transport dans les *tokamaks* qui rencontrent des difficultés de mesure dans le plasma très chaud.

L'objectif principal du groupe «*Fusion Technology Materials*», au PSI, reste l'investigation des dégâts produits par l'irradiation d'une variété de matériaux, en particulier ceux qui sont des candidats prometteurs pour les composants structurels d'un futur réacteur à fusion. Dans ces machines, les neutrons de fusion à haute énergie produiront des cascades de déplacements et des transmutations nucléaires. Cela influencera fortement les propriétés physiques et mécaniques des matériaux structurels qui doivent être sélectionnés parmi les éléments à basse activation. Les travaux les plus importants en 2007 se trouvent dans la préparation de nouveaux alliages et dans la conception de bancs d'essais.

En 2007 les activités suivantes, étroitement liées à *ITER*, ont été entreprises :

- L'installation *SULTAN* est unique au monde pour qualifier les supraconducteurs prévus pour *ITER*. Un nombre d'effets inquiétants concernant l'évolution des propriétés de supraconductivité a donné lieu à une série intense d'essais sur *SULTAN* pour comprendre, et ensuite éviter, cette dégradation. Le résultat en 2007 a généré un regain de confiance dans le *design* de ces conducteurs, qui sont sur le chemin critique de la construction d'*ITER*.
- Le CRPP héberge le «*Gyrotron Test Stand*», une installation de l'EPFL, pour tester les prototypes, puis les unités de production de ces générateurs d'ondes hyper-fréquences. La totalité de cette installation a fonctionné pour la première fois en 2007.
- Le CRPP est responsable de la conception et de la spécification d'un lanceur des ondes hyper-fréquences, réunissant ainsi ses compétences technologiques dans la génération des hautes puissances avec ses connaissances dans les effets physiques de ces ondes dans le *tokamak TCV*. Cette activité se poursuit en collaboration avec d'autres Associations EURATOM.
- Le CRPP est toujours responsable en 2007 de la définition des mesures magnétiques sur *ITER*, en collaboration avec d'autres Associations, mettant à disposition sa longue expérience sur le *tokamak TCV* dans ce domaine.
- Le CRPP, à travers l'un de ses membres, a participé directement à la conception des sys-

tèmes de contrôle-commande d'*ITER*, mettant aussi son expérience sur le *TCV* à disposition d'*ITER*.

En collaboration avec des laboratoires spécialisés (Laboratoire des systèmes énergétiques LASEN de l'EPFL et le *Center for Energy Policy and Economics* CEPE de l'ETHZ), les effets socio-économiques pertinents à la fusion sont étudiés. Le déploiement de la fusion permettra de réduire notablement les émissions de CO₂ en comparaison avec le cas de référence. Par rapport à la performance économique, les prédictions indiquent que la fusion sera compétitive par rapport au gaz naturel dans la 2^e moitié de ce siècle. L'utilisation de la technologie de fusion dans d'autres domaines est également à l'étude, mais n'a pour le moment pas encore produit de résultats tangibles.

Toutes ces activités de recherches ont abouti en 2007 à plus d'une centaine d'articles scientifiques dans des revues spécialisées et à de nombreuses communications lors de congrès internationaux en tant que papiers invités. L'excellence scientifique se manifeste aussi dans la formation : le CRPP a environ 40 doctorants sur un effectif total d'environ 160 personnes. Enfin, en 2007, 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.

Collaboration nationale

Studies related to plasma-wall interaction in *ITER*, University of Basle [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 lay-

ers with a thickness of 2 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.

A robust method for the finishing of high quality mirrors was successfully tested at the University



Figure 2: left: Rhodium mirrors exposed in a fusion reactor; right: Rhodium mirrors deposition (picture University of Basle).

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 optimiza-

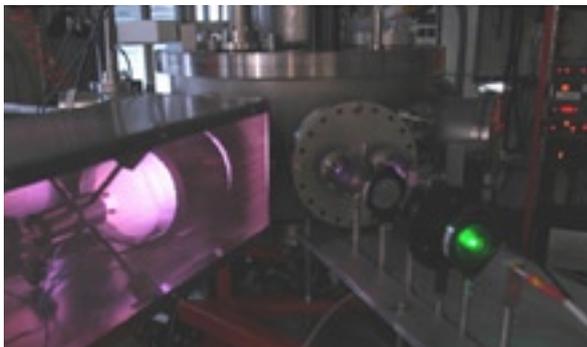


Figure 3: Plasma mirrors cleaning with in-situ laser reflectivity measurement (picture by University of Basle)

tion of the mirror reflectivity by such technique is a prerequisite for a successful mirror test.

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 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)

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)* 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. 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

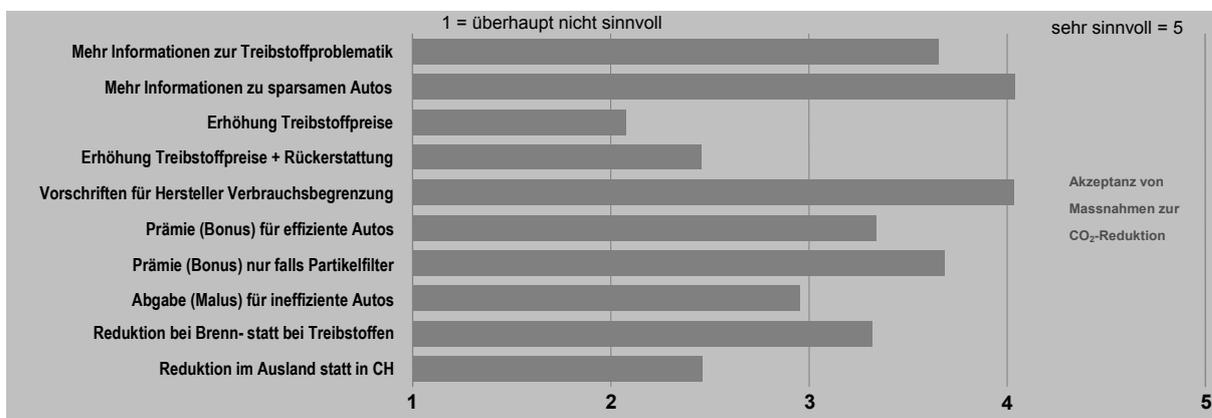
- [1] Site internet CRPP : <http://crppwww.epfl.ch>
- [2] Site internet Universität Basel : <http://pages.unibas.ch/phys-esca>
- [3] Site internet Joint Undertaking F4E : http://fusionforenergy.europa.eu/index_en.htm, Informations sur le Joint Undertaking «Fusion For Energy» et ses activités, incluant des appels d'offres ou des offres d'emplois
- [4] Site internet ITER-industry : <http://www.iter-industry.ch> Informations sur les offres d'emplois et sur les appels d'offres en relation avec le projet ITER ou sur la recherche européen dans le domaine de la fusion
- [5] Site internet EFDA : <http://www.efda.org>, Informations sur la recherche européenne dans le domaine de la fusion
- [6] Site internet ITER : <http://www.iter.org>, Informations sur le projet ITER
- [7] Site internet JET : <http://www.jet.efda.org>, Informations sur le Joint European Torus JET
- [8] L. Marot, P. Oelhafen, Universität Basel : *Studies related to plasma-wall interaction in ITER* (RA/JB) <http://pages.unibas.ch/phys-esca/fusion.html>

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

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Lukas Gutzwiller

lukas.gutzwiller@bfe.admin.ch



Befragung zum Thema «Autoklassen-Wechselverhalten»

Die Befragung zeigt, dass die Konsumenten sich immer noch zu wenig informiert fühlen. Eine grosse Mehrheit der Befragten befürwortet weitere Massnahmen zur CO₂-Reduktion im Verkehrsbereich. Bevorzugt werden Massnahmen, welche die individuelle Entscheidungsfreiheit gewährleisten, wie z.B. Bonussysteme (allenfalls mit Malus kombiniert). Unpopulär wären Treibstoffpreiserhöhungen und Massnahmen im Ausland (CO₂-Zertifikate).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im **Forschungsprogramm *Energiewirtschaftliche Grundlagen (EWG)*** des Bundesamts für Energie werden ökonomische, soziologische sowie politologische Fragestellungen bezüglich der Produktion, Verteilung bzw. Nutzung von Energie untersucht. Das im Forschungsprogramm erarbeitete Wissen ist die Basis sowohl für die Behandlung politischer Geschäfte (Ressortforschung) als auch für die längerfristige Ausrichtung der Energiepolitik (Grundlagenforschung). Es dient somit der Erarbeitung neuer und der Überprüfung bestehender Instrumente. Die Forschungsergebnisse des Programms kommen zudem den Kantonen, der Energiewirtschaft sowie verschiedenen Verbänden und Organisationen zugute (siehe auch www.ewg-bfe.ch).

Die energiewirtschaftliche Forschung befasst sich mit den energiepolitischen Rahmenbedingungen in den vier Wirtschaftssektoren **Haushalte, Verkehr, Dienstleistung** und **Industrie**, wie sie auch

den Perspektivmodellen zu Grunde liegen. Dazu kommen die **sektorübergreifende Energiepolitik**, der **Technologietransfer** sowie den **Energieumwandlungssektor** und die **Energiemärkte**.

2007 wurden sieben Projekte der energiepolitischen Ressortforschung ausgeschrieben. Im Bereich Grundlagen wurden zwei Projekte lanciert. Im November 2007 fand ein erster Workshop zu Forschungslücken in der energiewirtschaftlichen Grundlagenforschung statt (www.bfe.admin.ch/themen/00526/00535/index.html?lang=de&dossier_id=01705), mit den Themenschwerpunkten «Modelle», «Innovation» und «Verhalten».

Das Forschungsprogramm verfolgt zudem alle relevanten nationalen Aktivitäten im sozio-ökonomischen Bereich. Der vorliegende Bericht beschränkt sich jedoch auf die vom BFE direkt mitfinanzierte Projekte.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2007

GEBÄUDE UND ELEKTROGERÄTE

Ziel des Projekts ***Instrumente für Energieeffizienz im Strombereich*** [1] ist die Entwicklung neuer Lösungen zur Förderung der Energieeffizienz auf der Nachfrageseite im Elektrizitätsbereich, dies auch im Kontext der anvisierten Öffnung des Strommarktes in der Schweiz. Dazu sollen drei bis vier mögliche Fördermodelle für die Schweiz erarbeitet und bewertet werden. In der ersten Phase des Projekts wurden die in ausgewählten Ländern der EU bestehenden Instrumente zur Förderung der Effizienz auf der Nachfrageseite im Elektrizitätsbereich ausgewertet. Die wichtigsten Ergebnisse zeigen, dass ein *Instrumenten-Mix* zur Erreichung der Stromreduktionsziele einzusetzen ist. Abgesehen von einer Energie- bzw. Stromlenkungsabgabe, Vorschriften und Labels, sollte dieser einen nationalen Stromsparerfonds, die Verpflichtung der Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) auf Einsparziele (inkl. Handel mit «weissen» Zertifikaten) und Massnahmen der Preisregulierung umfassen.

Der Stellenwert der *Vorschriften* ist im zukünftigen Instrumenten-Mix zu erhöhen. Neben einer Ausweitung der Energieverbrauchsdeklaration/Labels auf weitere Anwendungen sowie deren Dynamisierung sind verstärkt Zulassungsanforderungen einzuführen. Zur besseren Ausschöpfung bestehender Effizienz-Potenziale sollte ein *nationaler Stromsparerfonds* eingerichtet werden. Der Fonds zielt durch gesamt-schweizerische Effizienz-Programme auf Förderung der Sensibilisierung, des Wissen und Know-hows der Marktteilnehmer und der einzelnen Technologien und Anwendungen

ab. Bei Bedarf kann der Stromsparerfonds zu einem späteren Zeitpunkt zu einem umfassenden Energieeffizienz-Fonds weiterentwickelt werden. Die EVU sollten zukünftig verstärkt in die Stromeffizienz-Politik miteingebunden werden. Falls keine Energielenkungsabgabe als Schlüsselinstrument eingeführt wird, steht die *Verpflichtung der EVU* auf Einsparziele im Vordergrund. Um die Wirksamkeit und die Effizienz dieses Instruments zu erhöhen, sollte es erstens mit dem Handel mit weissen Zertifikaten verknüpft werden. Zur Reduktion des Interessenskonflikts der EVU zwischen Stromabsatz und Effizienz-Gewinnen ist zweitens eine Verknüpfung mit Massnahmen der Preisregulierung notwendig. Zudem sollten sich die EVU an den Ausschreibungen des Stromsparerfonds beteiligen können.

In der Vorstudie ***Erhebung von Energiekennzahlen von Wohnbauten*** [2] soll abgeklärt werden, wie die Energiekennzahlen (EKZ) von Gebäuden mit Baujahr vor 1980 zuverlässig und dennoch kostengünstig erhoben werden können. In einer ersten Phase sollen bestehende Erhebungen zu EKZ miteinander verglichen und bezüglich Erhebungsaufwand/Kosten und Qualität/Plausibilität analysiert werden. Diese beiden Parameter sollen in einem Analyse- und Bewertungsraster für möglichst viele verschiedene Erhebungsmethoden erstellt werden. Dabei stehen vier Datengrundlagen der Kantone ZH, GR, GE und BS zur Verfügung.

Es hat sich in der Berichtsperiode gezeigt, dass der Parameter Energiebezugsfläche wegen den unterschiedlichen Erhebungsmethoden (Gebäu-

deversicherung, Konzessionäre, Gebäudeschätzer etc.) mit grossen Unsicherheiten verbunden ist, weshalb die Daten aus den vier Kantonen nicht direkt unter einander vergleichbar sind. Aus diesem Grund wurde beschlossen, die vom Bundesamt für Statistik (BfS) im Gebäude- und Wohnregister (GWR) erfassten Daten der Energiebezugsflächen zu verwenden und darauf basierend die Energiekennzahl für repräsentative Bauten zu berechnen. Auf Basis aller zusammengetragenen und erarbeiteten Informationen sind verschiedene mögliche Methodiken zur Erhebung von EKZ nach den Kriterien Machbarkeit und Aufwand beurteilt worden. Daraus lässt sich folgendes Fazit ableiten:

- Die Verwendung bestehender Erhebungen von EKZ für kantonale Vergleiche oder zur Berechnung von gesamtschweizerischen Durchschnittswerten kann aufgrund der sehr unterschiedlichen Erhebungsmethodiken und der teils zweifelhaften Qualität der Erhebungen nicht empfohlen werden;
- Die Qualität von Flächendaten, die durch eine schriftliche, freiwillige Befragung der Wohnungs- oder Gebäude-EigentümerInnen gewonnen wurden, ist für die Berechnung von EKZ ungenügend;
- Die im GWR vorhandenen Flächendaten sind zum heutigen Zeitpunkt für EKZ Berechnungen noch zu ungenau. Die Qualität der Flächendaten wird sich allerdings vermutlich langfristig verbessern, da das GWR bei jedem bewilligungspflichtigen Neu- und Umbau aktualisiert wird.

Potenzial, Wirtschaftlichkeit und Förderinstrumente für Abwasserwärmenutzung [3] werden abgestützt auf bestehenden Kanalisationsplänen untersucht. Es sind folgende Betrachtungen für die Wirtschaftlichkeit der Abwasserwärmenutzung zu berücksichtigen:

- Abwärme von ARAs konkurriert mit Wärme aus dem Grundwasser; zudem liegen die ARAs relativ weit weg von Wohngebäuden, was ein grosses Fernwärmenetz bedingt;
- Es muss zwischen Abwärme aus Klärbecken und Kanalabwärme unterschiedet werden. Letztere ist eher teurer und technisch noch nicht zuverlässig verwertbar;
- Die Abwasserwärmenutzung wird wirtschaftlich interessant, wenn die Wärmegestehungskosten geringer als 10 Rp./kWh sind. Dies wird nur von Anlagen erreicht, welche einen Wärmeabsatz von mehr als 3.5 MWh pro m Leitungslänge aufweisen. Dies gilt jedoch nur, wenn die baulichen Voraussetzungen (Zugänglichkeit und Platzverhältnisse zu Heizzentrale und zu Abwasserkanal resp. ARA) gut sind;

- Heizzentralen mit grosser Leistung können pro Kilowatt Wärmeleistung deutlich günstiger erstellt werden als Zentralen mit kleiner Leistung. Attraktive Wärmegestehungskosten um 10 Rp./kWh resultieren bei den untersuchten Objekten erst ab einer Leistung von über 3'000 kW;
- Eine gute Planung ist wichtig. Die wirtschaftlichen Kenndaten streuen sehr stark.

Die im vorliegenden Projekt entwickelte und auf GIS-Daten basierende Methode ermöglicht erstmals die systematische Ermittlung des Nutzungspotenzials aus dem Wärmeangebot im Vergleich zur möglichen Wärmenachfrage im Umkreis der Anlagen. Das theoretische Potenzial aller ARAs beträgt 15.84 TWh/a unter der Annahme, dass das Abwasser des gesamten ARA-Abflusses auf 5 °C abgekühlt wird. Zum Bestimmen des wirtschaftlichen Potenzials wurden im Umkreis von drei Kilometern um die 296 grössten ARAs der Schweiz jene Hektarflächen herausgefiltert, welche die nötige Wärmedichte für eine wirtschaftliche Anlage aufweisen. Dies liefert eine potentielle Wärmenachfrage von 3.71 TWh/a (konkurrenzfähiger Anteil der Nachfrage bei einem Heizölpreis von CHF 80.- pro hundert Liter, inkl. Steuern und Abgaben), was rund einem Zehntel des Energiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser der Schweizer Haushalte entspricht. Davon ist bei typischer Auslegung jeweils 57% rein erneuerbare Energie aus dem Abwasser, was 2.12 TWh/a entspricht.

Im Projekt **Erhebung und Betriebsoptimierung der internen Lasten von Dienstleistungsgebäuden** [4] steht die Aufdatierung der EWG-Studie (Weber et al., 1996) im Vordergrund, in welcher eine mittlere Energiekennzahl Elektrizität von 300 MJ/m²a ermittelt wurde. Dieser Wert ist stark von der technischen Gebäudeausstattung abhängig. So lag der Wert bei vollklimatisierten Gebäuden um einen Faktor drei höher als bei unbelüfteten Gebäuden. Die durchschnittliche Stromkennzahl sank im Zeitraum 1986-1996 um ein Prozent pro Jahr. Die Hauptverbraucher waren zentrale EDV, Lüftung, Klimatisierung und Beleuchtung mit einem Verbrauchsanteil von 80 Prozent. Der Verbrauchsanteil der Bürogeräte betrug nur zehn Prozent. Neben der Aufdatierung der obigen Studie setzt das neue Projekt den Fokus auf den Energieverbrauch für Raumklimatisierung und für Nutzerverhalten/Betriebsmanagement und wird um die Grossverteiler erweitert. Es werden bewusst auch Minergie-Bürogebäude erfasst. Zudem wird die thermische Behaglichkeit der Belegschaft befragt und mit der Empfehlung SIA 180 verglichen. Ein besonderes Augenmerk wird auch der Handhabung von Beschattung (Sonnenstoren), Nachtlüftung etc. gewidmet. Auch die internen Lasten werden erhoben.

Das Projekt **REMODECE (Residential Monitoring to Decrease Energy Use and Carbon**

Emissions in Europe) [5] ist ein EU-Projekt, welches unter dem Programm *Intelligent Energy Europe* läuft und vom BFE kofinanziert wird. Schwerpunkte der Untersuchung sind neben den bekannten traditionellen Haushaltgeräten vor allem die neuen elektronischen Geräte und ihr Standby-Verbrauch. Das Programm umfasst zwei Hauptthemen:

- Elektrische Verbrauchsmessungen in Haushalten;
- Befragungen über Haushaltsausrüstung und -verbrauchsverhalten.

Im Jahr 2007 standen die Feldmessungen der ca. 100 Haushalte und die Befragungen von ca. 500 Haushalten in den einzelnen Ländern im Vordergrund. Dazu waren Abstimmungen notwendig, um am Schluss vergleichbare Resultate zu erhalten.

Folgende Punkte erwiesen sich bei den Messungen als schwierig:

- Teilnehmende: Da Messungen mit Besuchen, Befragungen und Messinstallationen verbunden sind, ist es allgemein schwierig «neutral»-teilnehmende Haushalte zu finden. Dabei werden immer zwei klassische «Sünden» begangen: Freunde/Kollegen/Bekannte werden befragt, Geschenke werden verteilt;
- Saisonale Wirkungen: Kurze Messperiode finden über zwei Wochen statt und werden für ein ganzes Jahr hochgerechnet;
- Verbrauch ausserhalb der Wohnung: In Mehrfamilienhäusern befinden sich wichtige Verbrauchskomponenten (Licht allgemeine Räume, Pumpen und Brenner für Heizung und Warmwasser, Waschen und Wäschetrocknen, etc.) ausserhalb der einzelnen Wohnungen;
- Mess- und Datenübertragungsfehler: Bei allen gewählten *Low-Cost*-Messsystemen gibt es zeitweise Datenausfall und Messfehler. Der Umgang damit ist anspruchsvoll;
- Einzelne Länder hatten Schwierigkeiten, aus Kostengründen die versprochene Anzahl Messungen zeitgerecht durchzuführen.

Bei den Befragungen liegen erst wenige Ergebnisserien vor. Auch hier hat sich die Fragebogenbeantwortung als schwierig erwiesen, wenn nicht eine professionelle Struktur (*GfK*-Panels etc.) bereits vorhanden ist. Es wird deutlich, dass in verschiedenen europäischen Ländern aus ökonomischen, klimatischen oder sozio-kulturellen Gründen die Ergebnisse deutlich voneinander abweichen.

Das neu gestartete Projekt **Praxistest Minergie-Sanierung** [6] hat zum Ziel, die bisherige Praxiserfahrung bei der Sanierung nach Minergie sowohl für Wohnbauten als auch für Dienstleis-

tungsgebäude zu erfassen, zu analysieren und Handlungsbedarf zur Verbesserung der Rahmenbedingungen abzuleiten. Mit einer schriftlichen Befragung werden sowohl Bauherren, welche nach Minergie saniert haben, aber auch solche, welche sich nicht für Minergie entschieden haben, einbezogen.

Die verbrauchsabhängige Heiz- und Warmwasserkostenabrechnung (VHKA) in Neubauten wird vom eidgenössischen Energiegesetz verlangt und in den Kantonen weitgehend vollzogen. Im Gegensatz dazu ist der Vollzugsgrad in bestehenden Bauten je nach Kanton sehr unterschiedlich (siehe Stand der Energiepolitik in den Kantonen 2006). Da der Vollzug in den meisten Kantonen bei den Gemeinden liegt, sind die Angaben über den Vollzugsgrad mehrheitlich geschätzt. Ziel des Projekts **Vollzug und Optimierung des Instruments VHKA** [7] ist es, erstens den Vollzugsgrad/Ausrüstungsstand der VHKA bei den Kantonen und Gemeinden abzufragen, zweitens, zu prüfen, welches die Auswirkungen von Ausnahmeregelungen sind, und drittens, Empfehlungen für die Optimierung der VHKA zu geben.

TECHNOLOGIETRANSFER UND INNOVATIONS-PROZESSE

Das Projekt **Innovationsprozesse für Energietechnologien** [8] zielt auf eine vertiefte und systematische Erhebung ausgewählter Innovationsprozesse im Bereich von Energietechnologien. Mit Blick auf die Rolle des Bundesamtes für Energie (BFE) bei der Forschungs-, Technologie- und Innovationsförderung werden Ansatzpunkte und Instrumente für eine Optimierung der Innovationsförderung abgeleitet. Auf der Basis von qualitativ angelegten Fallstudien wurden zehn Innovationsprozesse in den Bereichen Photovoltaik, Wärme-Kraft-Kopplung, Wärmepumpen-Tumbler, Stromumrichter und Holzvergasung analysiert. Es wurden insbesondere Meilensteine der jeweiligen Entwicklungen im zeitlichen Rückblick sowie Hemm- und Förderfaktoren identifiziert. Die Auswahl der einzelnen Fallstudien beruhte auf verschiedenen Kriterien. Die gewählten Innovationsprozesse stehen mindestens kurz vor der Marktumsetzung, enthalten eine ausgeprägte Technologiekomponente und sind in der Regel durch externe Fördergelder (insbesondere vom BFE) unterstützt worden. Es wurden verschiedene Unternehmenstypen und Erfolge bzw. Misserfolge einbezogen.

Aus der Gesamtschau und den Kernaspekten der einzelnen Fallstudien werden insgesamt elf verschiedene Ansatzpunkte zur Optimierung von Innovationsprozessen abgeleitet. Es ist zu beachten, dass das Untersuchungsdesign mit zehn Fallstudien streng genommen keine Verallgemeinerung erlaubt, dafür aber im Detail aufgezeigt

werden konnte, weshalb die jeweiligen Prozesse von verschiedenen Einflüssen profitierten bzw. gehemmt wurden. Die Ansatzpunkte setzen primär bei der Förderstrategie und einzelnen Instrumenten des BFE an und sind nach absteigender Priorität geordnet:

- In- und ausländische Marktentwicklungen in den betreffenden Technologie bzw. Innovationsfeldern sind entscheidend für den späteren Innovationserfolg;
- Das BFE fördert insbesondere Forschung und Technologie, in späteren Innovationsphasen fehlt aber oft eine entsprechende Unterstützung;
- Begrenzte Ressourcen bei den geförderten KMU (Kapital, Unternehmensführung, etc.) behindern zum Teil Innovationsprozesse;
- Netzwerke zur Ausbildung und zu F+E an den Hochschulen stärken Innovationsprozesse wesentlich;
- Spielräume bei der Zuteilung und Verwendung finanzieller Mittel können den Innovationsprozess fördern;
- Neben den gesprochenen finanziellen Mitteln sind fachliche Unterstützung und persönliches Engagement und Begleitung für Innovationsprozesse elementar;
- Engagement von Innovationsverantwortlichen auf Seite der Fördernehmer kann ein zentraler Erfolgsfaktor sein;
- Dynamik und Grundstimmung in Forschungs- und Projektgruppen tragen und stabilisieren Innovationsprozesse;
- Fehlende Standardisierung von Normen und Bewilligungsverfahren bremsen Innovationsprozesse;
- Die Verfügbarkeit von ergänzenden und weiterführenden Förderquellen erleichtern den stabilen Fortgang von Innovationsprozessen;
- Die KTI ist ein wichtiger Player für spätere Innovationsphasen.

Im Projekt **Auswirkungen politischer Energiesparmassnahmen auf die Innovationskraft, die Beschäftigung und die internationale Konkurrenzfähigkeit der Schweiz** [9] wird die Innovation in einem Allgemeinen Gleichgewichtsmodell endogenisiert. Dabei dient die Endogenisierung der adäquaten Erfassung der Wachstumskräfte in Abhängigkeit von energiepolitischen Szenarien. Dadurch sollen u.a. Visionen (z.B. die 2000W-Gesellschaft) auf ihre Wirtschaftstauglichkeit geprüft werden. Zur Abbildung der Innovationsanreize werden verschiedene Kapitalarten (physisches, Human- und Wissenskapital) in ihrer sektorspezifischen Dynamik erfasst und Spillovers berücksichtigt.

VERKEHR

Das Projekt **Autoklassen-Wechselverhalten** [10] untersucht den möglichen Einfluss von Lenkungsabgaben auf den Neuwagenkauf. Ohne Verzicht auf Autogrösse sind beim Neuwagenkauf grosse CO₂-Reduktionspotentiale vorhanden: Minimaler und maximaler CO₂-Ausstoss eines jeden Modells unterscheiden sich stark. Mehrere EU-Mitgliedstaaten haben darum bereits Anreizsysteme eingeführt. Die Befragung von Schweizer Autofahrer und -käufer zeigt, dass der Wunsch nach weiteren Informationen zur Energieeffizienz der Fahrzeuge vorhanden ist, CO₂-Reduktionsmassnahmen beim Motorisierten Individualverkehr (MIV) befürwortet werden, und die Einführung von Bonussystemen am meisten akzeptiert würde.

Zur Prognose der Markt- und Umweltauswirkungen von Anreizsystemen beim Neuwagenkauf wurde die Mikrosimulationssoftware *sim.car* entwickelt. Wesentliche Neuerungen sind die Unterscheidung von 40 Kundensegmenten und eine sehr detaillierte Angebotsflotte. Damit kann abgebildet werden, wie unter Bonussystemen zu effizienteren und/oder kleineren Autos gewechselt wird. Berücksichtigt werden auch geldpsychologische Effekte und Elemente eingeschränkter Rationalität (begrenzte Anzahl betrachteter Modelle, Markentreue, usw.). Ausserhalb der Modellgrenzen bleiben indirekte Effekte, welche die Wirkungen von Anreizsystemen verstärken. Die normative Komponente staatlicher Anreizsysteme führt längerfristig zu Anpassungen der Präferenzen der Konsumenten. Das geänderte Kaufverhalten führt überdies längerfristig zu angepassten Forschungs- und Entwicklungsausgaben der Autohersteller und damit zu einer Beschleunigung der technischen Entwicklung in Richtung erhöhter Energieeffizienz. Wichtigste Grösse ist die Finanzierungsseite der Bonussysteme. Deshalb sollte zuerst im politischen Entscheidungsprozess festgelegt werden, welcher CO₂-Effekt erreicht werden soll. Dies legt die zu wählende Einnahmenseite fest.

Mittels Simulation kann anschliessend ermittelt werden, welche Ausgestaltung des Anreizsystems zu einer möglichst günstigen Massnahmeneffizienz führt. Alle simulierten Anreizsysteme zeigen sehr niedrige Vermeidungskosten je Tonne CO₂. Die CO₂-Reduktionswirkungen würden einen wesentlichen inländischen Beitrag darstellen. Eine Optimierung der Energie-Etikette könnte die vorgestellten Anreizsysteme in ihrer Wirkung weiter verbessern. Bonussysteme entfalten in den ersten drei bis vier Jahren die grösste Wirkung, weil Neuwagen in ihren ersten Jahren gefahren werden. Der vollständige Effekt trifft mit der nahezu kompletten Flottenumwälzung nach ca. zehn Jahren ein; dann hat jener Teil der Konsumenten, welcher überhaupt erreicht wird, sein Kaufverhalten unter Einfluss der Bonusprämien

verändert. Haushaltneutrale Anreizsysteme beim Neuwagenkauf erreichen für sich allein die Ziele des CO₂-Gesetzes nicht. Sie stellen den ersten, notwendigen Schritt dar, dem weitere Schritte zur Internalisierung der externen Kosten fossilen Energieverbrauchs zu folgen hätten.

Im April 2007 wurde das Projekt **Roundtable for Sustainable Biofuels** [11] mit einer Medienmitteilung der EPFL lanciert (<http://EnergyCenter.epfl.ch/Biofuels>). Ziel ist es, in einem *Multistakholder Dialogue* die Nachhaltigkeitskriterien für Biotreibstoffe zu definieren, basierend auf welchen ein international anerkanntes Label für Biotreibstoffe eingeführt werden kann. Der Lenkungsausschuss lädt die betroffenen Akteure aus Industrie, Hochschulforschung, Regierungs- und Nichtregierungsorganisationen dazu ein, im Rahmen von Arbeitsgruppen bei der Entwicklung und Kommentierung von Grundsätzen und Kriterien im Zusammenhang mit den ökologischen und sozialen Auswirkungen von Biokraftstoffen sowie den allgemeinen Vorteilen bezüglich der Treibhausgase mitzuwirken. Zu den Interessensgebieten gehören der Schutz der Artenvielfalt, der Wasservorräte sowie der Arbeitnehmer- und Landrechte und der Beitrag von Biokraftstoffen zur wirtschaftlichen Entwicklung in ländlichen Gebieten. Der Runde Tisch wird über Online-Technologien, Konferenzgespräche und Regionaltagungen Meinungen austauschen und Rückmeldungen erteilen, damit Entwicklungsländer und benachteiligte Gruppen eine sinnvolle Gelegenheit erhalten, zur Erarbeitung der Normen beizutragen.

UMWANDLUNGSSEKTOR (ERNEUERBARE ENERGIEN UND MARKTORDNUNG)

Die Studie **Finanzierungsansätze für erneuerbare Energien in Europa** [12] befasst sich mit den in ausgewählten Ländern verfügbaren Finanzinstrumenten für Projekte im Gebiet der erneuerbaren Energien. Im Vordergrund stehen die Fremdkapitalseite, die Mezzanine-Mittel, sowie direkte Forderungen oder Garantien. Nur in speziellen Fällen wird auf Möglichkeiten bei der Eigenkapitalbeschaffung verwiesen, da diese mit der grossen lokalen und regionalen Vielfalt der Standortforderung, Start-up-Unterstützung oder generell der Unternehmensforderung vermischt ist. Die Relevanz der Untersuchung leitet sich aus den grossen Auswirkungen der Finanzierungsbedingungen auf z.B. den Gestehungspreis der Energie her. An einem Beispiel wird dargelegt, dass ein identisches Projekt ganz unterschiedliche finanzielle Belastungen durch den Kapitaldienst erfährt. Die zwei betrachteten Finanzierungsvarianten unterscheiden sich wegen der Bonität des jeweiligen Promotors. Um einen aktiven und wachsenden Markt für Projekte zu schaffen, sollten v.a. die kleinen und mittleren Promotoren der Gestalt unterstützt werden, so dass die Bonität des Pro-

jektes im Vordergrund steht und nicht die Bonität des Promotors. Bei einem Investitionsvolumen von 3.0 Mio CHF resultieren bei den schlechteren Konditionen Mehrkosten für den Kapitaldienst von ~900'000 CHF verteilt auf die ersten fünf Jahre. Entsprechend haben Promotoren mit höherer Bonität, wie z.B. Elektrizitätswerke und Grossfirmen einen entscheidenden Kostenvorteil, selbst bei identischen Projektverhältnissen.

In verschiedenen Ländern sind unterschiedliche Mechanismen geschaffen worden, um Projekte im Bereich der erneuerbaren Energien zu unterstützen. Der Umfang der Studie beschränkt sich auf die für die Schweiz relevanten Technologien und Projektgrössen. Spezielle Beachtung erhalten jene Länder, in welchen die Marktreife der entsprechenden Technologien nahe an den Schweizerischen Verhältnissen liegt. Die Marktreife dient als Sammelindikator für politische, wirtschaftliche und technische Rahmenbedingungen. Übrig bleiben zur näheren Analyse die Technologien Biogas, Solarenergie, Geothermie, Kleinwasserkraft und die Länder Frankreich, Österreich, Dänemark, Deutschland, Norwegen, Slowenien, Belgien und die Schweiz.

Ziel des Projekts **Bewertung von Wiederherstellungs- und Ersatzmassnahmen bei der Konzessionierung von Wasserkraftanlagen** [13] ist es, eine methodische Grundlage zu erarbeiten, mit welcher die unterschiedlichen Interessenlagen dargestellt, allfällige Interessenkonflikte ermittelt und im Rahmen der gesetzlich vorgesehenen Interessenabwägung im Rahmen der Entscheidungsfindung transparent und mit grösstmöglicher Objektivität beurteilt werden können. Insbesondere soll eine möglichst allgemeine und objektive Darstellungs- und Bemessungsgrundlage für Ersatz- und Ausgleichsmassnahmen erstellt werden.

Rechtliche Vorgaben, Hilfsmittel oder Massstäbe, die zur Herleitung und Bestimmung der im Einzelfall korrekten Gewichte herangezogen werden können, fehlen weitgehend. Mit anderen Worten: Die Bewertung der einzelnen Interessen und die Bezeichnung der zu berücksichtigenden Interessen müssen auf zusätzliches Wissen abgestützt werden.

Zentrale Vorgehensleitlinie für die Interessenabwägung ist der folgende Dreischritt:

- Erstens müssen alle relevanten Interessen ermittelt werden;
- In einem zweiten Schritt sind sie zu bewerten, zu beurteilen bzw. zu gewichten;
- Drittens hat eine Optimierung der Interessen bzw. eine Interessenabwägung im engeren Sinne stattzufinden.

Dabei ist eine «Verrechnung» von Umweltmassnahmen nicht zulässig, es sei denn, sie sei ex-

plizit vorgesehen (wie beispielsweise bei der Schutz- und Nutzungsplanung nach Art. 32 Bst. c GSchG). Grundsätzlich sind stets die Anforderungen jeder relevanten Norm zu erfüllen. Weil bei vielen der im Rahmen der Wasserkraftnutzung relevanten Normen verhältnismässig enge und einfach nachvollziehbare Vorgaben für die Bewertung von Schutz, Wiederherstellungs-, und Ersatz-Massnahmen fehlen, muss sich die Bewertung der Interessen auf «ausserrechtlichem» Fachwissen abstützen.

Im Projekt **Holz als Rohstoff und Energieträger – Entwicklungstendenzen 2025** [14] soll untersucht werden, wie sich der Holzmarkt hinsichtlich der stofflichen und der energetischen Verwendung in der Schweiz in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren innerhalb des europäischen Umfelds entwickeln wird. Dafür ist ein Excel-basiertes Sektormodell für den Holzmarkt zu entwickeln, das durch die Auftraggeber selber bedient werden kann. Dieses Modell soll auf einer vereinfachten Input-Output Tabelle (IOT) aufbauen, wie sie durch *Infras* und *Geopartner* erstellt wurde. Es soll versucht werden, die statische Betrachtung der IOT zu dynamisieren, beispielsweise mit 5-Jahresschritten bis 2025. Dieses Tool soll es den Bundesämtern erlauben, gewisse forst- und energiepolitische Massnahmen grob modellieren zu können. Beispielsweise soll damit der Einfluss der Energiepolitik (Förderung Holzheizungen via Globalbeiträge und Einspeisevergütung für erneuerbaren Strom) und der Neu- und Erweiterungsinvestitionen in der Holzindustrie abgeschätzt werden können. Das Projekt wurde im Herbst 2007 gestartet.

Die energetische Nutzung von Reststoffen aus Biomasse (organischer Abfall, Restholz) steht grundsätzlich in Konkurrenz mit der rein stofflichen Nutzung, beispielsweise als Kompost oder für Spanplatten aus Restholz. Bei der stofflichen Nutzung steht die Schliessung des Materialkreislaufs im Vordergrund: Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor werden als Dünger wieder verwendet. Bei der energetischen Nutzung kann prozessmässig zwischen Vergärung und Verbrennung unterschieden werden: Gärgut kann als Dünger weiter genutzt werden, bei der Verbrennung steht abfallwirtschaftlich die umweltverträgliche Entsorgung im Vordergrund, eventuell mit Extraktion von Schwermetallen. Auf der Nutzungsseite besteht eine Konkurrenz zwischen Wärme, Strom und Treibstoff aus Biomasse. Im Projekt **Bewertungsmethode für Technologien zur optimalen energetischen und ökologischen Nutzung von biogenen Abfällen** [15] soll eine Methode entwickelt werden, um die Nutzung von Biomasse entsprechend den Nachhaltigkeitskriterien (Umwelt- und Gesellschaftsverträglichkeit sowie Wirtschaftlichkeit) zu bewerten.

In der Diskussion um die Elektrizitätsmarktliberalisierung spielt der Erhalt des Service Public eine wichtige Rolle. Auch entsprechend dem StromVG ist der Erhalt der Stromversorgungssicherheit eine öffentliche Aufgabe. Deshalb spielt die Versorgungssicherheit, insbesondere die Vermeidung kurzfristiger Unterbrüche der Elektrizitätslieferung, bei der Regulierung der Übertragungs- und Verteilnetze eine wichtige Rolle. Dabei geht es um die Bemessung und Bewertung des Service Public: wie müssen Versorgungssicherheit und Unterhaltskosten des Verteilnetzes gegeneinander abgewogen werden? Welches ist das optimale Sicherheitsniveau zwischen Grenznutzen des höheren Sicherheitsniveaus und den Grenzkosten für Investitionen in die Versorgungssicherheit? Diesen Fragen geht das Projekt **Zahlungsbereitschaft für Service Public im Strombereich** [16] nach, welches im Herbst 2007 gestartet wurde.

Die Realisierung von geologischen Tiefenlagern ist nach heutigem Stand der Technik möglich – wissen und sagen die Techniker, Wissenschaftler und die Behörden. Ein Teil der Bevölkerung, aber auch Umweltorganisationen äussern heftige Zweifel oder bestreiten dies. Manchmal sind solche Äusserungen gepaart mit Misstrauen gegenüber den involvierten Stellen. Es ist eine Illusion, dass selbst ein transparentes und partizipatives Vorgehen wie der «Sachplan Geologische Tiefenlager» alle Zweifel und das Misstrauen bezüglich der technischen Realisierbarkeit und der Sicherheit eines solchen Projekts ausräumen wird. Das Projekt **Sachplan: Kommunikation mit der Gesellschaft** [17] soll Grundlagen für die Informations- und Kommunikationstätigkeiten für die Behörden einerseits und für die partizipativen Gremien andererseits während der Umsetzungsphase des Sachplans liefern, unter besonderer Berücksichtigung des Vertrauensaufbaus zwischen den Akteuren und des konstruktiven Dialogs.

SEKTORÜBERGREIFENDE ENERGIEPOLITIK

Die Schweiz gehört beim CO₂-Ausstoss und dem Energieverbrauch im Privatverkehr und bei der Raumwärme nicht zu den Musterschülerinnen innerhalb Europas. Im Gegenteil: Bei den Personenwagen ist sie unter den Schlusslichtern, und auch bei den Heizungen steht sie im Vergleich zu skandinavischen Ländern deutlich schlechter da. Zu diesem Schluss kommt das Projekt **Indikatoren für den internationalen Vergleich des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen** [18]. Im Privatverkehr und bei der Raumwärme bestehe in der Schweiz im Vergleich zu einigen EU-Staaten (EU-15) noch erhebliches Verbesserungspotenzial in Sachen CO₂-Ausstoss und Energieverbrauch, heisst es in der Studie. So schneidet die Schweiz im Vergleich des Treibstoffverbrauchs der bestehenden Personenwagen und der Neuwagen vor Schwe-

den am zweitschlechtesten ab. Auch bei den Treibhausgasemissionen pro Kilometer ist sie auf dem vorletzten Platz. Beim Heizenergieverbrauch pro Wohnfläche liegt sie im Vergleich zu ausgewählten europäischen Ländern zwar ähnlich wie Deutschland und Österreich im Mittelfeld, jedoch deutlich hinter den skandinavischen Ländern; wegen des hohen Heizölanteils gehören Schweizer Haushalte beim Pro-Kopf-Ausstoss von CO₂ zu den europäischen Schlusslichtern, und auch der Dienstleistungssektor weist im europäischen Vergleich hohe CO₂-Emissionen pro Quadratmeter Bürofläche auf. Die unterschiedliche Anzahl Heiztage in den untersuchten Ländern wurde dabei berücksichtigt. Der Industriesektor weist dagegen im Vergleich zum Ausland und bezogen auf die Wertschöpfung (kaufkraftkorrigiert) gute Energieverbrauchs- und Treibhausgasemissionswerte auf. Dies ist gemäss der Studie auf die spezielle Struktur der Schweizer Industrie zurückzuführen, mit ihrem geringen Anteil der energieintensiven Branchen. Um differenzierte Aussagen zum Verbesserungspotenzial in diesem Sektor bezüglich Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen machen zu können, wären aber detaillierte Untersuchungen der Branchen und der verfügbaren Technologien erforderlich.

Ziel der Studie **Empirische Erfahrungen mit Ökosteuern in Europa** [19] ist die Erhebung der empirischen Erfahrungen mit Energieabgaben und andern Instrumenten zur Internalisierung von externen Kosten («*cap and trade*») in europäischen Ländern. Dabei soll einerseits der Lenkungseffekt und andererseits – sofern möglich – der Einfluss auf den Arbeitsmarkt (Lohnnebenkosten) untersucht werden.

Befürchtungen, die Steuern könnten das Wirtschaftswachstum und die Beschäftigung bremsen, wurden in den untersuchten Ländern nicht bestätigt. Tendenziell werden sogar positive Effekte beobachtet. Denn in den meisten untersuchten Ländern wird der Grossteil der Mittel wieder an die Wirtschaft und die Haushalte zurückgegeben. Am häufigsten geschieht dies in Form einer Senkung der Lohnnebenkosten, was vor allem dem Arbeitsmarkt positive Impulse verleiht. Die Autoren der Studie gehen davon aus, dass sich die Erfahrungen auf die Schweiz übertragen lassen. Die bisher für die Schweiz verfügbaren Modellrechnungen weisen darauf hin, dass auch von höheren Abgaben kaum negative Wirkungen auf Wirtschaftswachstum und Beschäftigung zu erwarten wären (vgl. Band 3 der Energieperspektiven unter www.energieperspektiven.ch). Voraussetzung ist neben der Rückverteilung der Mittel an die Haushalte und die Wirtschaft eine stufenweise Einführung der Steuern und Abgaben, wie sie sich in vielen Ländern durchgesetzt hat und auch in der Schweiz populär ist. Dies ermöglicht es den Steuersubjekten, sich über einen klar de-

finierten Zeitraum an die veränderten Rahmenbedingungen anzupassen. Bei den Abgabesätzen der Energie- oder CO₂-Steuer verweist die Studie auf grosse Unterschiede innerhalb der Länder und zwischen den verschiedenen Energieträgern. Die ökologisch motivierten Steuern üben bisher noch einen relativ bescheidenen Einfluss auf die Endverbraucherpreise der belasteten Energieträger aus. Sollen Lenkungssteuern längerfristig zu ambitionierten Energie- und CO₂-Zielen beitragen (etwa im Sinne der 2000 Watt-Gesellschaft), sind höhere Abgabesätze zwingend.

Die Studie **Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft** [20] analysiert mögliche Kosten von klimabedingten Schäden, die innerhalb der Schweiz entstehen könnten und wurde auf Vorschlag BFE unter Federführung des BAFU durchgeführt. Die klimabedingten Schäden in vier Lebens- und Wirtschaftsbereichen wurden mithilfe eines Allgemeinen Gleichgewichtsmodells analysiert und bewertet. Der schleichende Klimawandel wird vor allem in den Bereichen «Tourismus» sowie «Energie» zu Schäden führen. Die Bereiche «Bauten und Infrastruktur» sowie «menschliche Gesundheit» sind dagegen von den vermehrt eintretenden Extremereignissen betroffen, insbesondere von Hochwasser, Rutschungen und Hitzeperioden. Der erwartete Schaden ist im Energiebereich und im Wintertourismus am grössten. Nicht berücksichtigt sind katastrophale, aber sehr unsichere Ereignisse, wie globale Kippeffekte, ein verändertes Landschaftsbild (vor allem im Hochgebirge) sowie Auswirkungen auf die Ökosysteme (z.B. Verlust einheimischer Arten).

Den Berechnungen ist eine globale Temperaturerhöhung von 3 °C bis ins Jahr 2100 unterstellt, was für die Schweiz eine Erwärmung von gut 4 °C bedeutet. Bei diesem Szenario muss die Schweiz mit spürbaren Wohlfahrtsverlusten als Folge der Klimaänderung rechnen. Sie werden für das Jahr 2050 auf 1 Mia. CHF geschätzt. Danach steigen die klimabedingten Wohlfahrtsverluste deutlich an. Gelingt es, den globalen Temperaturanstieg bis 2100 auf 2 °C zu begrenzen, so werden die Schadenskosten für 2050 nur halb so hoch geschätzt. Ab der kritischen «Erwärmungsschwelle» von global 2 °C, spart die Schweiz bis 2100 mit jedem Grad vermiedener Erwärmung jährlich Schäden in der Grössenordnung von 0,6 bis 1 Mia. CHF. Dazu ist jedoch eine griffige globale Energie- und Klimapolitik nötig. Welche Instrumente stehen dem Staat bei der Bewältigung dieser Probleme zur Verfügung? Es sind dies Verbote und Gebote, finanzielle sowie persuasive Massnahmen. An dieser Stelle stehen die finanziellen Massnahmen im Zentrum der Betrachtung. Im Energiebereich kommen sie oft zum Einsatz, um etwa die Anwendung von erneuerbaren Energien oder von Energiesparmassnahmen zu

fördern. Sie gelten in Form von Lenkungsabgaben als Schlüssel für den nachhaltigen Umgang mit (Energie-) Ressourcen. Finanzielle Anreize sind darüber hinaus beliebte Instrumente, da ihre Wirkungen (scheinbar) einfach vorhersehbar (Nutzenkalkül der Zielgruppen) und zu kontrollieren (Vergabekriterien) sind. Verschiedene Unsicherheiten tauchen bei der Anwendung finanzieller Massnahmen auf: So etwa ist die Abgrenzung zwischen Strafen (finanzielle Bussen), Anreizen, Belohnungen und symbolischen Massnahmen in der Praxis oftmals verwischt. Ferner wird der Mitnahmeeffekt (Personen, die finanzielle Zuschüsse in Anspruch nehmen, das vom Staat erwünschte Handeln aber auch ohne die Zuschüsse an den Tag gelegt hätten) teilweise nicht beachtet oder mangels empirischer Daten gar ignoriert.

Im Projekt **Theoretische Beschreibung finanzieller Massnahmen und des Mitnahmeeffekts** [21] soll der Frage nachgegangen werden, welche empirischen Ergebnisse generell vorhanden sind und welche Rückschlüsse diese auf eine «Best practice» beim Einsatz von finanziellen Massnahmen zulassen. Zudem werden die Fragen gestellt: In welcher Grössenordnung bewegen sich die Mitnahmeeffekte je nach Ausgestaltung der Instrumente? Welche Schlussfolgerungen lassen

sich aus theoretischen wie empirischen Befunden für die zukünftige Gestaltung von finanziellen Massnahmen im Energiebereich ziehen?

Um die Wirksamkeit der Instrumente zu verbessern stellt sich die Frage, welche psychologischen und sozialen Vorgänge und Mechanismen bei den Endnutzern hinsichtlich des Verbrauchs von Energie bei welchen Instrumenten und Instrumentenkombinationen von Bedeutung sind. Im Projekt **Sozialwissenschaftlicher Forschungsbeitrag für die Energiepraxis** [22] werden mit einer Literaturstudie folgenden Fragen untersucht:

- Über welche psychologischen und sozialen Mechanismen funktionieren Interventionsinstrumente zur Senkung des Gesamtenergieverbrauchs grundsätzlich und welche psychologischen und sozialen Dynamiken und (Neben-)Effekte können grundsätzlich auftreten?
- Wie können diese Dynamiken in der Ausgestaltung von Instrumenten und deren Kombination berücksichtigt werden, damit die Wirksamkeit der Instrumente verstärkt wird?
- Wie sieht die Berücksichtigung der Dynamiken im konkreten Fall anhand eines Beispielinstruments aus?

Nationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des Forschungsprogramms *Energie-wirtschaftliche 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 wurde 2007 auch ein Workshop zur Grundlagenforschung organisiert, an welchem vor allem Vertreter der Hochschulen teilnahmen. Für die energiepolitische Ressortforschung 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 Resultate werden die EWG-Projektausschreibungen jeweils mit einer Medienmitteilung gestreut. Diese wurden im Berichtsjahr durch die Tagespresse durchwegs positiv aufgenommen. Das Projekt Autoklassen-Wechsel ist eine wichtige Grundlage für die energiepolitische Ausgestaltung des Bonus-Malus Systems, welches über die Autoimportsteuer Anreize für den Kauf von energieeffizienten Fahrzeugen schaffen soll. Der Bericht wurde mehrfach in den Parlamentskommissionen verwendet. Die beiden Berichte zu Stromeffizienz und Energiesteuern in Europa waren zudem eine Grundlage für den Aktionsplan Energieeffizienz. An der Tagung des Departements *Erfolgskontrolle* der kantonalen Energiefachstellen wurden mehrere EWG-Projekte vorgestellt.

Internationale Zusammenarbeit

In diversen Projekten sind internationale Hochschulinstitute oder Forschungsstellen direkt beauftragt oder im Rahmen von einzelnen Projekten beteiligt. Die Berücksichtigung der internationalen Forschungsliteratur und der rege Austausch an Fachkongressen, in Zeitschriften usw. stellt dabei

eine Selbstverständlichkeit dar. In den Projekten **Erfahrung mit Ökosteuern in Europa und Instrumente für Energieeffizienz im Strombereich** wird mit *Ecologic* (Berlin) und der österreichischen Energie-Agentur zusammen gearbeitet und somit der Zugang zum europäischen Netz-

werk der Energieagenturen verschafft. Im Projekt **Kommunikation Sachplan Tiefenlager** ist die Firma *Dialogik* (Prof. Ortwin Renn) in Stuttgart involviert. Zudem wurde 2006 zusammen mit der EPFL und dem WEF (*World Economic Forum*) ein Projekt zum Labelling von Biotreibstoffen lanciert. Dieses Projekt soll einerseits die bestehenden europäischen Initiativen nutzen und darauf basierend eine international abgestützte Grundlagen für ein Label erarbeiten.

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 2007 und Ausblick 2008

Das Jahr 2007 war geprägt durch den Abschluss der im Frühjahr 2006 ausgeschriebenen Projekte sowie der Neuausschreibung von sieben neuen Projekten. Zudem wurde das Programm EWG für das Forschungskonzept 2008–2011 in Ressort- und Grundlagenforschung aufgeteilt. In letzterer sollen vermehrt Fragen des Innovationsprozesses, der gesellschaftlichen Akzeptanz und methodischer Verbesserungen der Perspektivenmodelle in Zusammenarbeit mit den Hochschulen untersucht werden. Zu den Forschungslücken in diesem Bereich wurde im November 2007 ein Workshop mit den Hochschulen durchgeführt. Bis

Ende Februar 2008 werden Projektideen definiert und danach über konkrete Projekte entschieden. Im Jahr 2007 stand der Abschluss von Projekten der sektorübergreifenden Energiepolitik im Vordergrund wie der Bericht zu den Energieindikatoren, den Energiesteuern, aber auch die Klimafolgekosten für die Schweiz, ein Projekt, das zusammen mit dem BAFU durchgeführt wurde. Zudem wurden weitere Projekte im Bereich und Biomassenutzung lanciert.

Eine grössere Ausschreibungsrunde ist für April 2008 geplant.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2007 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.ewg-bfe.ch und www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer)

- [1] S. Hammer (stephan.hammer@infras.ch), Infras, Zürich, N. Peherstorfer (österreichische Energieagentur) **Instrumente für Energieeffizienz im Strombereich** (SB Projekt 101'993).
- [2] R. Dettli, S. Bade (econcept), W. Baumgartner (A&W) (reto.dettli@econcept.ch) **Erhebung von Energiekennzahlen von Wohnbauten** (SB Projekt 101782).
- [3] R. Rigassi, S. Gutzwiller, H.-P. Eicher (reto.rigassi@eicher-pauli.ch) **Potenzial, Wirtschaftlichkeit und Förderinstrumente für Abwasserwärmenutzung** (SB Projekt 101'722).
- [4] D. Aiulfi, Sorane SA, A. Primas (Basler und Hoffmann) (dario.aiulfi@sorane.ch) **Erhebung und Betriebsoptimierung der internen Lasten von Dienstleistungsgebäuden** (JB).
- [5] C.U. Brunner (cub@ABinternational.ch) **REMODECE (Residential Monitoring to Decrease Energy Use and Carbon Emissions in Europe)** (JB).
- [6] H. Rütter, U. Rütter, (Rütter und Partner), W. Hässig (sustec), M. Jakob (CEPE) (heinz@ruetter.ch) **Praxistest Minergie Sanierung** (JB).
- [7] S. Rieder (stefan.rieder@interface-politikstudien.ch) **Vollzug und Optimierung des Instruments VHKA** (JB).
- [8] A. Berwert (Rütter und Partner), J. Markard (EAWAG) (adrian.berwert@ruetter.ch) **Innovationsprozesse für Energietechnologien** (JB).
- [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] P. de Haan, M. Müller, A. Peters, A. Hauser, ETH Zürich (dehaan@env.ethz.ch): **Autoklassen-Wechselverhalten** (JB).
- [11] H. Püttgen, E. Gnansounou, C. Opal, S. Haye, EPFL (hans.puttgen@epfl.ch) **Roundtable for Sustainable Biofuels** (JB).
- [12] P. Schwer, (New Energy Scout) (p.schwer@newenergyscout.com) **Finanzierungsansätze für erneuerbare Energien in Europa** (SB Projekt 101'668).
- [13] W. Ott, S. Bade (econcept), J. Leimbacher (Büro Leimbacher), J. Hürlimann (Aquaplus) (walter.ott@econcept.ch) **Bewertung von Wiederherstellungs- und Ersatzmassnahmen bei der Konzessionierung von Wasserkraftanlagen** (SB Projekt 101'725).
- [14] B. Pauli, SHL (Bernhard.Pauli@shl.bfh.ch) und O. Thees, WSL, **Holz als Rohstoff und Energieträger – Entwicklungstendenzen 2025** (JB).

- [15] R. Dettli, Econcept, Zürich (reto.dettli@econcept.ch), M. Bättig und R. Frischknecht (esu-services) **Bewertungsmethode für Technologien zur optimalen energetischen und ökologischen Nutzung von biogenen Abfällen** (JB).
- [16] S. Vaterlaus, K. Becker, Polynomics (Stephan.Vaterlaus@polynomics) **Zahlungsbereitschaft für Service Public im Strombereich** (JB).
- [17] W. Schenkel, Synergo (schenkel@synergo.ch) und D. Gallego, Dialogik **Sachplan: Kommunikation mit der Gesellschaft** (JB).
- [18] R. Hohmann, B.S.S. (Roland.Hohmann@bss-basel.ch) **Indikatoren für den internationalen Vergleich des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen** (SB 99'997).
- [19] M. Peter, R. Iten (Infras) H. Lückge (Ecologic) (martin.peter@infras.ch) **Empirische Erfahrungen mit Ökosteuern in Europa** (SB Projekt 101'729).
- [20] A. Müller, Ecoplan (mueller@ecoplan.ch) **Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft** (SB Projekt 99'997).
- [21] S. Rieder (stefan.rieder@interface-politikstudien.ch) **Theoretische Beschreibung finanzieller Massnahmen und des Mitnahmeeffekts** (JB).
- [22] A. Artho (Uni Zürich) (artho@sozpsy.uzh.ch) **Sozialwissenschaftlicher Forschungsbeitrag für die Energiepraxis** (JB).

ANHANG / ANNEXE

EIDGENÖSSISCHE ENERGIEFORSCHUNGSKOMMISSION CORE COMMISSION FÉDÉRALE POUR LA RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE CORE

Mitglieder / Membres	Vertreter von / Représentant
Dr. Kaiser Tony, Präsident Alstom Power, Future Technologies, Direktor	Grossindustrie <i>la grande industrie</i>
Closset Alexandre VHF-Technologies SA, CEO	KMU, Jungunternehmen <i>les PME, les jeunes entreprises</i>
Ständerat Freitag Pankraz Kanton Glarus	Kantone, Politik <i>les Cantons, la politique</i>
Prof. Dr. Gutscher Heinz Universität Zürich	Universitäten (Sozialwissenschaft) <i>les Universités (sciences sociales)</i>
Hunziker-Ebnetter Antoinette Forma Future Invest AG, CEO	Investoren, Risikokapital <i>les investisseurs, le capital-risque</i>
Prof. Dr. Kunze Christian École d'Ingénieurs du Canton du Vaud, Directeur	Fachhochschulen, Schweizerischer Nationalfonds <i>les Hautes écoles spécialisées, le Fonds national suisse</i>
Dr. Leutenegger Hajo Wasserwerke Zug AG, Direktor	Energiewirtschaft (Wasser und Gas), economiesuisse <i>l'économie énergétique (eau et gas), economiesuisse</i>
Dr. Lustgarten George Allan Technology and Business Consulting, CEO	Beratungsfirmen <i>les bureaux de conseil</i>
Prof. Dr. Lux-Steiner Martha Christina Hahn-Meitner-Institut, Bereichsleiterin Solarenergieforschung	Universitäten, internationale Beziehungen <i>les Universités, les relations internationales</i>
Prof. Dr. Püttgen Hans-Björn Energy Center EPFL, Directeur	ETH-Lausanne <i>l'EPF de Lausanne</i>
Rohrbach Kurt BKW-FMB Energie AG, Direktionspräsident	Energiewirtschaft (Elektrizität) <i>l'économie énergétique (électricité)</i>
Prof. Dr. Schlapbach Louis EMPA, Gesamtleiter	EMPA, KTI <i>le LFEM, la CTI</i>
Togni Giuseppina eTeam TOGNI ENERGIE GmbH, Mitinhaberin	Ingenieurbüros, KMU <i>les bureaux d'ingénieurs, les PME</i>
Prof. Dr. Wokaun Alexander PSI, Leiter Forschungsbereich allgemeine Energie	PSI, ETH-Zürich, SATW, swisselectric research <i>le PSI, l'EPF de Zürich, ASST, swisselectric research</i>
Dr. Wüstenhagen Rolf HSG, Vizedirektor Institut für Wirtschaft und Ökologie	Universitäten (Ökonomie, Ökologie, Entrepreneurship) <i>les Universités (économie, écologie, entrepreneuriat)</i>
Beobachter / Observateurs	Amt / Office
Dr. Schmitz Rolf Leiter Sektion Energieforschung	Bundesamt für Energie BFE <i>Office fédéral de l'énergie OFEN</i>
Zürcher Daniel Leiter Sektion Innovation	Bundesamt für Umwelt BAFU <i>Office fédéral de l'environnement OFEV</i>
Dr. Zinsli Paul-Erich stellvertretender Direktor	Staatssekretariat für Bildung und Forschung SBF <i>Secrétariat d'État à l'éducation et à la recherche SER</i>
Sekretariat / Secrétariat	Adresse / Adresse
Dr. Maus Katja BFE, Sektion Energieforschung	Tél. 031 322 39 78, Fax : 031 323 25 00 e-mail : katja.maus@bfe.admin.ch

BFE-FORSCHUNGS- UND MARKTBEREICHE (2008)

DOMAINES DE L'OFEN POUR LA RECHERCHE ET POUR LE MARCHÉ (2008)

		Forschung <i>Recherche</i>		Markt / EnergieSchweiz <i>Marché / SuisseEnergie</i>
	Programme <i>Programmes</i>	Programmleiter <i>Chefs de programme</i>	Bereichsleiter <i>Responsables de domaine</i>	Bereichsleiter <i>Responsables de domaine</i>
Effiziente Energienutzung <i>Utilisation efficace de l'énergie</i>	Energie in Gebäuden <i>Energie dans les bâtiments</i>	C. Filleux	A. Eckmanns	S. Wiederkehr
	Verkehr <i>Transports</i>	M. Pulfer	M. Pulfer	H. Scherrer
	Akkumulatoren / Supercaps <i>Accumulateurs / Supercondensateurs</i>			---
	Verfahrenstechnische Prozesse <i>Technologie des procédés</i>			A. Mörikofer
	Elektrizitätstechnologien & -anwendungen <i>Technologies et utilisations de l'électricité</i>	R. Brüniger	a.i. T. Krause	F. Frey
	Netze <i>Réseaux</i>	R. Bacher		---
	Wärme-Kraft-Kopplung <i>Couplage chaleur-force</i>	T. Kopp	A. Eckmanns	F. Rognon
	Verbrennung <i>Combustion</i>	S. Renz	S. Hermle	
	Kraftwerk 2020 / CCS <i>Centrales à gaz 2020 / CCS</i>	P. Jansohn	G. Siddiqi	
	Brennstoffzellen <i>Piles à combustible</i>	S. Oberholzer	S. Oberholzer	---
Erneuerbare Energien <i>Sources d'énergie renouvelables</i>	Wasserstoff <i>Hydrogène</i>	A. Luzzi	S. Oberholzer	---
	Photovoltaik <i>Photovoltaïque</i>	S. Nowak		U. Wolfer
	Industrielle Solarenergienutzung <i>Utilisation industrielle de l'énergie solaire</i>	P. Renaud		
	Solarwärme (inkl. Wärmespeicherung) <i>Chaleur solaire (incl. stockage)</i>	J.-C. Hadorn	A. Eckmanns	F. Rognon
	Umgebungswärme (Wärmepumpen, Kälte) <i>Chaleur ambiante (pompe à chaleur, froid)</i>	T. Kopp		
	Holzenergie <i>Énergie du bois</i>	S. Hermle	S. Hermle	D. Binggeli
	Biomasse (ohne Holz) <i>Biomasse (sans le bois)</i>			B. Guggisberg
	Wasserkraft <i>Force hydraulique</i>	K. Jorde	a.i. T. Krause	
	Geothermie <i>Géothermie</i>	R. Minder	G. Siddiqi	M. Geissmann
	Windenergie <i>Énergie éolienne</i>	R. Horbaty	K. Maus	
Kernenergie <i>Énergie nucléaire</i>	Kerntechnik und Nukleare Sicherheit <i>Technique et sécurité nucléaires</i>	J. Dreier	C. de Reyff ¹⁾	---
	Regulatorische Sicherheitsforschung <i>Recherche réglement. en sécurité nucléaire</i>	T. Bigler		
	Kernfusion <i>Fusion nucléaire</i>	A. Werthmüller		
EWG / WTT <i>FEE / TST</i>	Energiewirtschaftliche Grundlagen <i>Fondements de l'économie énergétique</i>	a.i. L. Gutzwiller		
	Wissens- und Technologietransfer <i>Transfert scientifique et technologique</i>	Y. Calisesi		

¹⁾ Das BFE ist hier lediglich Auskunftsstelle / L'OFEN a ici un rôle de répondant

ADRESSEN DER BFE-BEREICHSLEITER / ADRESSE DES RESPONSABLES DE DOMAINES À L'OFEN

Daniel Binggeli, Tel. 031 322 68 23
Yasmine Calisesi, Tel. 031 322 53 21
Georges Darbre, Tel. 031 325 54 91
Andreas Eckmanns, Tel. 031 322 54 61
Felix Frey, Tel. 031 322 56 44
Markus Geissmann, Tel. 031 322 56 10
Bruno Guggisberg, Tel. 031 322 56 40
Lukas Gutzwiller, Tel. 031 322 56 79
Sandra Hermle, Tel. 031 325 89 22
Thilo Krause, Tel. 031 322 56 63
Katja Maus, Tel. 031 322 39 78

Andreas Mörikofer, Tel. 031 322 56 35
Stefan Oberholzer, Tel. 031 325 89 20
Martin Pulfer, Tel. 031 322 49 06
Christophe de Reyff, Tel. 031 322 56 66
Fabrice Rognon, Tel. 031 322 47 56
Hermann Scherrer, Tel. 031 322 56 70
Rolf Schmitz, Tel. 031 322 56 58
Gunter Siddiqi, Tel. 031 322 56 11
Stefan Wiederkehr, Tel. 031 324 21 93
Urs Wolfer, Tel. 031 322 56 39

Gemeinsame Adresse: **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

Thomas Bigler
HSK, 5232 Villigen – HSK
Tel. 056 310 39 19 – Fax: 056 310 39 95
E-mail: thomas.bigler@hsk.ch

Roland Brüniger
R. Brüniger AG
Zwillikerstr. 8, 8913 Ottenbach
Tel. 044 760 00 66 – Fax: 044 760 00 68
E-mail: roland.brueiniger@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

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

Andreas Luzzi
HSR Hochschule für Technik Rapperswil
Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil
Tel. 055 222 48 22 – Fax: 055 222 48 44
E-mail: andreas.luzzi@solarenergy.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

Bundesamt für Energie BFE / Office fédéral de l'énergie OFEN

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen · Postadresse / adresse postale: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch