



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

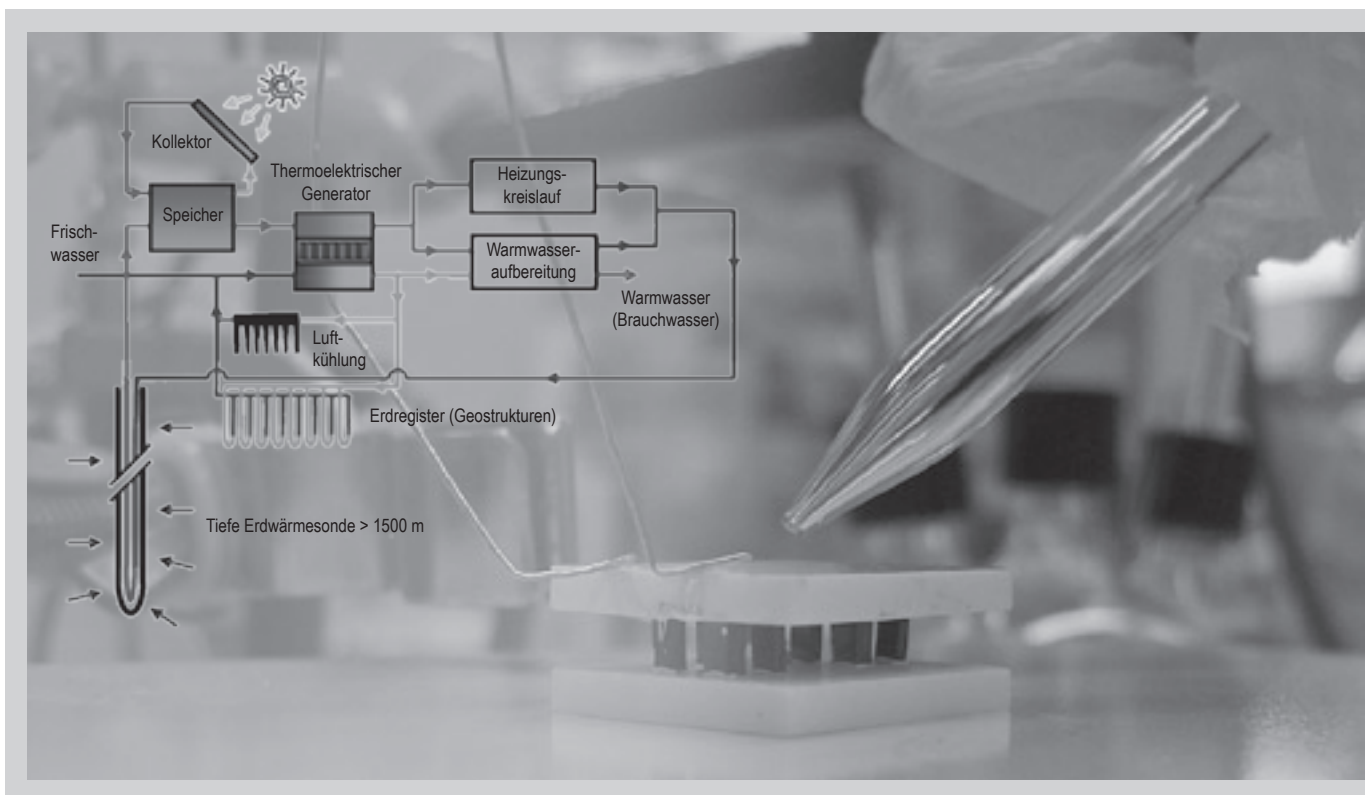
Bundesamt für Energie BFE

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

Office fédéral de l'énergie OFEN

Recherche énergétique Energie-Forschung 2006

Rapports de synthèse des chefs de programme
Überblicksberichte der Programmleiter



Avant-propos / Vorwort		3
Survol de la recherche énergétique en 2006 / Fortschritte der Energieforschung 2006		4
Rapports de synthèse des chefs de programme / Überblicksberichte der Programmleiter		
UTILISATION EFFICACE DE L'ÉNERGIE / EFFIZIENTE ENERGIENUTZUNG	Effiziente Energienutzung in Gebäuden	11
	Verkehr und Akkumulatoren	25
	Elektrizität	35
	Netze	49
	Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte	57
	Feuerung und Verbrennung	69
	Kraftwerk 2020	81
	Brennstoffzellen und Wasserstoff	91
	Verfahrenstechnische Prozesse	109
SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLES / ERNEUERBARE ENERGIEN	Solaire actif : chaleur et stockage de chaleur	117
	Photovoltaik	131
	Industrielle Solarenergienutzung	147
	Biomasse	153
	Kleinwasserkraftwerke	165
	Geothermie	173
	Wind	183
ÉNERGIE NUCLÉAIRE / KERNENERGIE	Nukleare Sicherheit und Entsorgung	193
	Regulatorische Sicherheitsforschung	207
	Fusion thermonucléaire contrôlée	221
FONDEMENTS DE L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE / ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN	Energiewirtschaftliche Grundlagen	229
Annexes / Anhänge		
Sigles / Abkürzungen		239
Organisation de la recherche énergétique (R+D & P+D) / Energieforschungsorganisation (F+E & P+D)		240
Adresses importantes / Wichtige Adressen		241

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 de ceux pour les *installations pilotes et de démonstration* (P+D) relève de chefs de programme internes ou externes à l'OFEN. Par ailleurs, outre la recherche énergétique, l'OFEN est actif dans la promotion des technologies sur le marché, par le biais du programme *SuisseEnergie*. Chaque programme de recherche est rattaché à un domaine technologique spécifique, dont le responsable interne à l'OFEN coordonne la recherche, le développement, la démonstration et l'introduction sur le marché. On trouvera, en annexe, un survol de l'organisation avec les adresses de contact.

La *Liste des projets de la recherche énergétique de la Confédération 2004/2005* donne des renseignements sur les dépenses des pouvoirs publics pour la recherche énergétique, ainsi qu'une revue détaillée des montants provenant des diverses sources de financement. Les chiffres pour 2006 ne sont pas encore connus ; ils devraient être du même ordre de grandeur que ceux de l'année précédente. Estimations pour 2006 : 165 MCHF, dont 10 MCHF pour les projets P+D. Quant aux dépenses de l'OFEN, elles se sont élevées à 22,75 MCHF, dont 2,55 MCHF pour les projets P+D.

Le présent volume comprend les rapports de synthèse annuels des chefs de programme de l'OFEN. On y trouvera décrits les progrès accomplis dans les divers projets cofinancés par l'OFEN. Il y est également fait mention des travaux de RD&D réalisés avec d'autres moyens publics et/ou privés. Ce rapport peut être consulté et téléchargé – tout comme d'autres publications – sur le site Internet de l'OFEN : www.recherche-energetique.ch (Thème : Rapports de synthèse). La plupart des rapports annuels (RA) des projets individuels, cités dans les rapports de synthèse, sont aussi téléchargeables. Les rapports finaux (RF) des projets se trouvent aussi 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.

Mai 2007
OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉNERGIE

Page de titre : schéma d'une installation de conversion thermoélectrique d'énergie dans un bâtiment / caractérisation d'un échantillon de matériau thermoélectrique (sources : EPF Zurich / LFEM, 2006).

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. Neben der Energieforschung ist das BFE mit dem Programm *EnergieSchweiz* auch in der Markteinführung tätig. Jedes Forschungsprogramm ist in einen Technologiebereich eingegliedert, in dem Forschung, Entwicklung, Demonstration und Markteinführung von einem BFE-internen Bereichsleiter koordiniert werden. 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 liegen noch nicht vor; sie dürften jedoch ähnlich ausfallen wie im Vorjahr. Schätzungen für 2006: 165 Mio. CHF, wovon 10 Mio. Franken für P+D-Projekte. Die entsprechenden Aufwendungen des BFE betrugen 22,75 bzw. 2,55 Mio. CHF.

Der vorliegende Band enthält die Jahres-Überblicksberichte der BFE-Programmleiter. 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 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.

Mai 2007
BUNDESAMT FÜR ENERGIE

Titelbild: Schema einer Installation zur thermoelektrischen Energiekonversion im Gebäude / Messungen an einer thermoelektrischen Materialprobe (Quellen : ETH Zürich / EMPA, 2006).

SURVOL DE LA RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE EN 2006

FORTSCHRITTE DER ENERGIEFORSCHUNG 2006

YASMINE CALISESI / MARTIN ZOGG

COORDINATION DE LA RECHERCHE OFEN / FORSCHUNGSKOORDINATION BFE

L'état des lieux de la recherche énergétique suisse s'effectue cette année dans un contexte contrasté. D'une part, les questions liées à l'approvisionnement énergétique et à l'impact de l'exploitation des vecteurs énergétiques sur l'environnement et le climat font l'objet de préoccupations marquées au sein de la population. Ces préoccupations s'accompagnent d'un regain d'intérêt pour les avancées, tant nationales qu'internationales, de la recherche énergétique. D'autre part, cependant, jamais la part du produit intérieur brut attribuée à la recherche énergétique en Suisse n'avait été aussi basse depuis le début des relevés, en 1977. Et ce, malgré le fait que celle-ci constitue l'un des piliers d'une politique décidément tournée vers un approvisionnement énergétique durable et rentable économiquement, et participant de l'effort à fournir pour limiter les émissions globales de gaz à effet de serre.

Une telle diminution de moyens va de pair avec une plus grande concentration des efforts consentis. Ainsi, l'un des grands perdants est le domaine des projets pilotes et de démonstration, dont le co-financement et l'exploitation scientifique ont été réduits de plus de la moitié au cours de ces 3 dernières années. La contribution de ces projets au processus de transfert de technologies de la recherche vers le marché est irremplaçable et fait aujourd'hui grandement défaut.

Malgré ces restrictions, l'année 2006 a été marquée par la mise sur pied de deux nouveaux programmes de recherche à l'OFEN, l'un dédié aux problématiques spécifiques des systèmes en *réseaux* (électriques ou autres), l'autre consacré à l'avancement des technologies relatives aux *centrales à gaz*. Il convient, une fois encore, de souligner ici l'engagement des chefs de programmes, internes et externes à l'OFEN, pour un suivi optimal des différents projets de recherche, et pour le maintien de compétences essentielles à la continuité de l'effort de recherche énergétique en Suisse. Notre reconnaissance va également à l'ensemble des chercheurs impliqués, sur la compétitivité desquels repose le succès des programmes en cours.

Le présent survol, dans lequel un choix forcément limité de projets est présenté ci-après, témoigne non seulement de l'excellence des résultats obtenus, mais également de la diversité des aspects faisant l'objet de la recherche énergétique, fondamentale ou appliquée, soutenue par les pouvoirs publics.

Die schweizerische Energieforschung befand sich im Berichtsjahr in einem gegensätzlichen Umfeld. Einerseits zeigte sich die Bevölkerung stark beunruhigt über die Fragen der Energieversorgung und der Umwelt- und Klimaeinwirkungen der Energienutzung. Diese Besorgnis drückte sich unter anderem aus in einem wiedererwachten Interesse an den nationalen und internationalen Fortschritten der Forschung. Andererseits waren jedoch die Aufwendungen für die Energieforschung – gemessen am Bruttoinlandprodukt – seit Beginn der Erhebungen 1977 noch nie so tief. Und dies, obwohl die Forschung als ein Pfeiler unserer Politik gilt, welche auf eine nachhaltige Energieversorgung ausgerichtet ist und sich für die Begrenzung der globalen Emissionen von Treibhausgasen einsetzt.

Eine Kürzung der Mittel führt gezwungenermassen zu einer Konzentration der Anstrengungen. Der grösste Verlierer war in diesem Fall das Gebiet der Pilot- und Demonstrationsprojekte. Hier wurden die Mittel für die Finanzbeiträge und die wissenschaftliche Auswertung in den letzten drei Jahren mehr als halbiert. Der Mangel an Pilot- und Demonstrationsprojekten ist bereits stark spürbar, sind sie doch für den Technologietransfer von der Forschung in den Markt nicht ersetzbar.

Trotz dieser Einschränkungen konnten 2006 zwei neue BFE-Forschungsprogramme ihre Arbeit aufnehmen: Eines befasst sich mit spezifischen Fragestellungen zu *Netzen* (elektrische und andere), das zweite mit neuen Technologien für *Gaskraftwerke*.

Es sei hier auf das grosse Engagement der BFE-internen und -externen Programmleiter hingewiesen, welche die verschiedenen Projekte optimal begleiten und für den Erhalt der wesentlichen Kompetenzen sowie die notwendige Kontinuität in der schweizerischen Energieforschung besorgt sind. Anerkennung gebührt auch allen involvierten Forschern – auf ihrem Einsatz beruht schlussendlich der Erfolg der durchgeführten Programme.

Der vorliegende Bericht zeigt die Vielfalt der behandelten Aspekte sowohl in der Grundlagen- als auch in der angewandten Forschung. Er zeugt aber auch von der Exzellenz der Ergebnisse der durch die öffentliche Hand finanzierten Energieforschung. Eine Auswahl von Projekten ist nachfolgend kurz zusammengestellt.

UTILISATION EFFICACE DE L'ÉNERGIE

En Suisse, la plus grande part de la consommation d'énergie primaire est attribuée aux **bâtiments**. La recherche liée au développement de **panneaux d'isolation sous vide**, par exemple, apporte de nouvelles solutions dans ce domaine. Le défi lié à la mise au point et à l'utilisation de ces éléments se situe dans l'élimination des **ponts thermiques**, en particulier lorsque les normes à atteindre correspondent au standard **Minergie**. Les techniques de fabrication, de construction et de montage des panneaux d'isolation ont été éprouvées en situation réelle, avec la construction d'un pavillon habitable.

En Suisse toujours, le domaine des **transports** se trouve au premier rang des sources émettrices de CO₂. Une contribution à la diminution de ces émissions est apportée par l'utilisation de vélos électriques (**E-Bikes**) plutôt que d'automobiles pour les déplacements en zone urbaine et sub-urbaine (distances jusqu'à 15 km). Les **E-Bikes** sont actuellement très en vogue et ont bénéficié en 2006 d'une augmentation de leur chiffre d'affaire annuel de 40%.

Un des domaines englobés par le programme de recherche sur l'**électricité** est celui de la **supraconductivité**, soit la propriété de certains matériaux à conduire le courant sans pertes lorsque ceux-ci sont soumis à des températures suffisamment basses. En 2006, un «câble» de 480 m de long et capable de soutenir un courant de 200 A a déjà été obtenu. De nombreux instituts suisses de recherche publics et privés sont actifs dans ce domaine, dont les applications potentielles touchent, également, au développement de transformateurs, de générateurs, ou encore au stockage de l'énergie.

Dans le cadre du nouveau programme de recherche sur les **réseaux** énergétiques, on s'intéresse notamment à la conception de **systèmes de chauffage urbain** pour la cogénération. Il s'agit ici d'optimiser un réseau exploitant de manière combinée la chaleur à distance, l'électricité et l'eau chaude. Des simulations montrent que le **couplage de différents cycles énergétiques** augmente l'efficacité énergétique, tout en permettant une diminution significative des émissions de CO₂.

Le programme de recherche sur la **chaleur ambiante** soutient des projets visant entre autres à l'amélioration du coefficient de performance (COP) des pompes à chaleur, et à l'utilisation de fluides de travail respectueux de l'environnement comme le dioxyde de carbone (CO₂). L'évaluation de la performance d'une **pompe à chaleur air/eau au CO₂** installée sur le toit de l'hôpital du Locle a démontré le potentiel de ces systèmes pour la préparation d'eau chaude sanitaire. Pour

EFFIZIENTE ENERGIE NUTZUNG

In der Schweiz entfällt der grösste Teil des Primärenergieverbrauchs auf **Gebäude**. Er lässt sich durch Bauten gemäss Minergie-, Minergie-P- und Passivhaus-Standard drastisch reduzieren. In diese Richtung zielen neue **Planungswerkzeuge**, ein interaktiver **Bauteilkatalog**, die Entwicklung hochwirksamer Vakuumisulationsbauelemente und isolierender **Tragelemente** zur Reduktion des Wärmebrückenproblems. Weitere Verbesserungen bringen neue **gebäudetechnische Lösungen** zur energieeffizienten Heizung und Sommerkühlung (beispielsweise passive Kühlung durch natürliche Nachtlüftung).

Der **Verkehr** verursacht den grössten Teil der CO₂-Emissionen. Die energetische Optimierung von **Einzelkomponenten** (CH-Zulieferindustrie!) und von ganzen **Antriebssystemen** (auch Hybridsysteme) zeigt vielversprechende Ergebnisse. In Arosa wird ein **schienengebundenes Individual-taxi** realisiert. Für den Nahverkehrsbereich wurde das **E-Bike** weiterentwickelt und erreichte einen Jahresumsatzzuwachs von 40%.

Die Vorteile der **Hochtemperatursupraleitung** für elektrischen Maschinen wurden aufgezeigt – ein Durchbruch benötigt aber noch weitere Materialforschung. Effiziente **Permanentmagnetmotoren** sind im Leistungsbereich <10 kW insbesondere für drehzahlvariable Antriebe interessant. Grenzen und Möglichkeiten **alternativer Stromerzeugungsarten** (thermoelektrisch, magnetisch) werden geklärt. Ein Funktionsmodell zur **Energiespeicherung** mit Druckluft erreichte einen Wirkungsgrad von 70%.

Das neue Programm **Netze** verbessert primär Elektrizitätsverteilnetze zur Bewältigung zunehmend dezentraler Einspeisungen und eines wachsenden grenzüberschreitenden Transports. Es sollen auch visionäre Ideen wie jene des **Energy Hub** für elektrische, thermische und chemische Energie angegangen werden.

Die **Wärmepumpen** setzen ihren Siegeszug fort: Etwa 70% der Neubauten werden mit Wärmepumpen beheizt; in der Schweiz wurde die 100'000-ste Wärmepumpe in Betrieb genommen. Die optimale Integration der **Warmwasserbereitung** in Wärmepumpenheizungen wurde aufgezeigt (COP für 10 °C/60 °C ca. 3.0) und die Testmethoden zur **Qualitätssicherung** wurden in internationaler Abstimmung auf die Kombination von Heizung und Warmwasserbereitung ausgedehnt. Die Machbarkeit einer **magnetischen Wärmepumpe** wurde für tiefe Vorlauftemperaturen bis ca. 35 °C theoretisch nachgewiesen – der Bau eines Funktionsmodells wird folgen.

une température d'eau froide injectée à moins de 15 °C et par une température extérieure de 0 °C, un COP de 3.2 est atteint pour la préparation d'eau chaude sanitaire à 60 °C.

L'amélioration du rendement des systèmes de **combustion**, la diminution des émissions polluantes qu'ils engendrent, et la diversification des carburants et combustibles employés font l'objet d'un autre programme de recherche de l'OFEN. Dans ce cadre, un outil de simulation a été développé, qui permet de tester, sur des circuits virtuels et au moment de leur conception, des **véhicules combinant divers types de moteurs**. Cet outil montre que la consommation de carburant d'un véhicule peut être réduite de 35%, si son moteur à essence à transmission manuelle est remplacé par un moteur hybride essence/électrique de même puissance totale et à transmission variable continue (CVT). Et ce, pour une conduite toujours aussi sportive!

Le programme **centrales à gaz 2020** soutient le développement des technologies nécessaires à l'augmentation du rendement électrique, à la réduction des émissions de CO₂, et à l'augmentation de la souplesse de fonctionnement des **centrales à gaz à cycle combiné**. On vise ainsi par exemple le développement d'un **générateur turbo** au rendement électrique supérieur à 99%. Les premières études ont montré qu'un tel rendement est effectivement réalisable, grâce à des mesures d'optimisation du flux de chaleur, du besoin en air de refroidissement, et de l'aérodynamisme de la turbine du générateur.

Les enjeux finaux associés au perfectionnement des techniques d'extraction de l'**hydrogène** et de production de **piles à combustibles** sont ceux liés au stockage de l'électricité et de la chaleur. Afin d'augmenter l'efficacité de la **photolyse**, soit l'utilisation directe du rayonnement solaire pour extraire l'hydrogène de l'eau, de nouveaux revêtements d'anodes sont étudiés. La déposition d'un film nanocristallin d'**hématite** (ou oxyde de fer Fe₂O₃) sur l'anode augmente ainsi de façon spectaculaire l'efficacité de la photolyse. Lorsque l'anode est de plus revêtue d'une couche monoatomique de cobalt, l'efficacité est encore renforcée par un effet catalytique.

Avec des émissions annuelles atteignant 6.8 millions de tonnes, l'**industrie** constitue la deuxième source d'émission de CO₂ en Suisse. Le programme de recherche en **technologie des procédés** encourage le développement de méthodes, d'outils et de technologies augmentant l'efficacité et le degré d'intégration des nouvelles technologies énergétiques dans les procédés industriels. L'efficacité d'une analyse selon la **méthode Pinch** a été démontrée sur une installation-type de fabrication de papier, dont la consommation de gaz naturel et de courant se trouvent

Die aufwändige numerische und experimentelle Erfassung der Vorgänge bei der **Verbrennung** wurde mit dem Ziel einer weiteren Reduktion der Schadstoffemission und einer Effizienzverbesserung verfeinert. Diesem Ziel dient auch ein in Betrieb genommener Prüfstand für die Verbrennung in **Grossdieselmotoren** und eine Weiterentwicklung der **partiellen katalytischen Oxidation** bei Gasturbinen.

Ziele des neuen Programms «**Kraftwerk 2020**» sind eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads von **Gaskombikraftwerken** auf 62%, die Verwendung erneuerbarer, CO₂-neutraler Brennstoffe und die Netzstabilisierung mit effizienten **Gasturbinen**. Im Jahr 2006 wurden unter wesentlicher Unterstützung durch die KTI bereits 8 Projekte in den Bereichen Turbogenerator (Wirkungsgrad >99% !), Beschaufelung, Biogas, Syngas und Verbrennung gestartet.

Sowohl bei SOFC-**Brennstoffzellen** wie auch bei PEFC-Brennstoffzellen wurde intensiv an der Lebensdauerverlängerung geforscht. Zur Speisung mobiler elektronischer Geräte wurde ein SOFC-Mikrosystem entwickelt. Neue Elektrodenmaterialien für PEFC-Systeme sollen eine deutliche Effizienzsteigerung bringen. Die **Wasserstoffproduktion** wurde in den Bereichen direkte solare Wasserspaltung, Photolyse und photoelektrochemische Wasserspaltung vorangetrieben. Zur **Wasserstoffspeicherung** wurden Hydridsysteme verbessert.

Die CH-**Industrie** verursacht in 77'000 Betrieben einen CO₂-Ausstoss von 6.8 Mt. Die Realisierung des Einsparpotenzials bis 50% wurde durch **Prozessintegration** (Beispiel aus der Papierherstellung: Erdgaseinsparung 24%, Amortisationszeit <2 Jahre) und Modellierung chemischer Batch-Prozesse vorangetrieben.

ERNEUERBARE ENERGIEN

In der Schweiz produzieren heute 400'000 m² **Solarkollektoren** 200 GWh/a Wärme. Getönte Kollektorabdeckungen konnten in eine industrielle Produktion übergeführt werden. Die erfolgreiche **Auslegungssoftware Polysun** wurde weiter verbessert und wird in fünf Sprachversionen vertrieben. Die Nachheizung mit Holzpellets wurde optimiert und ein **Kunstlichtprüfstand** zur Serie-Prüfung kommerzieller Solarkollektoren wurde in Betrieb genommen.

Der weltweite Photovoltaikmarkt boomt mit Jahreswachstumsraten um 35% und erreichte 2006 eine Produktion von 2'300 MWp. Die auch international sehr gut vernetzten Forschungsanstrengungen des BFE und der KTI im Bereich **Photovoltaik**

réduites de 24% et 1%, respectivement, pour un investissement compensé en moins de deux ans.

SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLES

Le programme de recherche sur le **solaire actif** – chaleur et stockage de chaleur couvre une vaste palette de projets, de la recherche fondamentale jusqu'à la mise en pratique à grande échelle. On y trouve ainsi, par exemple, le développement d'un **déphaseur thermique diffusif**, dispositif qui permet de stocker la fraîcheur de la nuit pour la diffuser durant le jour. L'étude de la longueur des tubes de stockage, et l'optimisation du type de réservoir de chaleur (tubes à eau, billes de ciment, plaques en terre cuite) a permis d'obtenir le déphasage souhaité de 12 h, ainsi que de réduire les dimensions du stock à 0.6 m³ par 100 m³/h d'air à refroidir.

L'une des priorités du programme de recherche en **photovoltaïque** est le transfert de technologies vers l'industrie. L'Institut de Microtechnique de l'Université de Neuchâtel et la start-up *VHF Technologies* (Yverdon) ont ainsi mis au point un procédé de déposition de silicium microcristallin en couches minces sur des **substrats en matière plastique**, permettant la production de **cellules solaires flexibles** en rubans. Grâce à ce procédé, le coût de l'électricité produite par le biais du photovoltaïque amorphe pourrait descendre en dessous de 0.8 €/W_c, pour une capacité de production annuelle de 50 MW_c.

Le point fort du programme de recherche sur **l'utilisation industrielle de l'énergie solaire** concerne les procédés thermochimiques, qui ouvrent la voie à des processus durables de production de matériaux et de combustibles. Les cycles thermochimiques de dissociation de l'eau, qui exploitent la chaleur issue du rayonnement solaire concentré, offrent par exemple la perspective d'une **production d'hydrogène** à grande échelle. Une étude montre que des rendements de plus de 80% peuvent être attendus dans la production d'hydrogène par hydrolyse du **zinc**, ce dernier étant préparé grâce au soleil.

Selon une étude de l'OFEN, au moins 10% des besoins de notre pays en énergie primaire pourraient être couverts par l'exploitation de la **biomasse**. L'établissement du bilan écologique et des effets sur la santé des différents agents énergétiques envisagés est l'une des tâches du programme de recherche correspondant. Un projet interdisciplinaire a montré que la **toxicité des particules fines** issues de la combustion du bois naturel dans un foyer automatique dépend fortement du **degré de combustion** atteint, et peut être de 5 à 10 fois inférieure ou supérieure à celle des suies émises par un moteur diesel.

Un concept faisant l'objet d'une étude avancée dans le cadre du programme de recherche sur

wurden durch **grosse Umsetzungserfolge** bei **Dünnschichtzellen** belohnt. Effiziente industrielle Abscheidungsprozesse für amorphe und mikrokristalline Siliziumzellen mit entsprechenden neuen Messmethoden wurden für Flächen über 1 m² realisiert. Sie versprechen Modulkosten unter 0.5 €/Wp. Der grösste europäische Solarzellenhersteller investiert in Schweizer Technologie für flexible Dünnschichtzellen. Ziel der Weiterentwicklung der Siliziumdünnschichtzellen ist ein Wirkungsgrad von 14%. Auch Dünnschichtzellen auf der Basis von Verbindungshalbleitern (CIGS, CdTe) und farbstoffsensibilisierte Zellen werden weiterentwickelt.

Das Programm **Industrielle Solarenergienutzung** wurde neu fokussiert. Der mit konzentrierter Solarstrahlung angetriebene thermochemische Zinkoxid/Zink-Kreisprozess zur **Produktion von Wasserstoff** mit Temperaturen bis 2000 °C wurde weiterentwickelt (u.a. 10-kW-Prototypreaktor). Er verspricht Energieumwandlungsgrade über 40%. Auch die Zinkoxid-Reduktion mit Kohlenstoff aus Kohle oder Erdgas als Reduktionsmittel wurde weiter erforscht.

Das nachhaltig nutzbare Potenzial der **Biomasse** liegt in der Schweiz bei 123 PJ oder ca. 10% des CH-Primärenergiebedarfs. Gegenwärtig werden davon erst 40% genutzt. Beim besonders interessanten **Holz** lagen die Schwerpunkte auf der Reduktion der Feinstaubemissionen, der Schaltungs- und Regelstrategie, der Kombination mit Solarwärme und der zusätzlichen Verwendung von Riedstreu und Pferdemist. Lösungen zur **Vergasung** nasser und trockener Biomasse wurden weiter vorangetrieben. Die erste kommerzielle Holzvergasungsanlage in der Schweiz und ein mit kaltgepresstem Rapsöl betriebenes **Blockheizkraftwerk** konnten erfolgreich in Betrieb genommen werden.

Zur Kostensenkung von **Kleinwasserkraftwerken** werden Auslegungsgrundlagen für Standardpumpen im Turbinenbetrieb erarbeitet und neue Diagonalturbinen entwickelt. Neue Propellerturbinen sollen schnell fliessende Gewässer nutzen. Auch **Trinkwasser** und Abwasser sollen vermehrt energetisch genutzt werden. Mit GIS-Systemen soll das Potenzial für Kleinwasserkraftwerke systematisch erfasst werden.

Die tiefe **Geothermie** erlitt nach Tiefenbohrungen bis 5000 m im Vorhaben **Deep Heat Mining** in Basel durch mehrere induzierte Erdstösse einen herben Rückschlag. Im Wallis werden die interessanten geothermischen Eigenschaften (Thermalwasser bis 110 °C !) des kristallinen Untergrunds weiter erforscht. Im Bereich der untiefen Geothermie werden optimale Lösungen zur freien

la **force hydraulique** (petites installations) est celui de l'exploitation de l'**énergie cinétique des cours d'eaux** rapides (en complément de celle de leur énergie potentielle). Une turbine pouvant être activée par le courant a ainsi été mise au point par la firme **UEK**. Les **turbines hydrocinétiques** offrent l'avantage d'un effort de mise en place minimal, et d'une installation respectueuse de la faune aquatique.

L'actualité du programme de recherche sur la **géothermie** a cette année été dominée par les phénomènes sismiques survenues à Bâle en décembre 2006. Ces secousses ont fait suite à l'injection d'eau sous haute pression dans le sous-sol bâlois, dans le cadre du projet **Deep Heat Mining**. Suite à ces événements, le projet a été suspendu, les moyens s'appliquant désormais à tirer les enseignements nécessaires des données recueillies. D'autres projets de recherche méritent cependant également d'être mentionnés ici, tels ceux visant par exemple à l'utilisation géothermique du **cristallin profond de la vallée du Rhône** pour la production d'électricité.

L'exploitation de l'**énergie éolienne**, quant à elle, continue à bénéficier d'un engouement remarquable. La puissance-crête totale installée mondialement a ainsi augmenté de 24% en 2005 par rapport à l'année précédente. Les défis à relever pour la recherche suisse dans ce domaine sont liés aux installations dans les régions de montagne et difficiles d'accès. La **nanotechnologie** entre ici en scène : l'utilisation de protéines « anti-gel » dans le revêtement des pales des rotors des éoliennes permet de freiner la croissance de givre sur les surfaces concernées.

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Le programme de recherche sur la **technique et la sécurité nucléaire** (en allemand «*Sicherheit*», en anglais «*safety*») a pour buts la sécurité de fonctionnement des centrales nucléaires, l'utilisation optimale des combustibles nucléaires, et le développement de solutions à long terme pour la gestion des déchets radioactifs. L'un des aspects de cette recherche est l'**analyse de la fiabilité humaine** (*human reliability analysis*, HRA). Il s'agit ici notamment de recenser et d'évaluer de façon quantitative les erreurs de commission, soit les actions commises de façon imprévue et ayant une influence négative sur l'évolution de défaillances. Une recherche de littérature a permis d'établir une liste de 17 actions de ce type, et d'en déterminer la probabilité.

Dans un registre voisin, la **recherche réglementaire en sécurité nucléaire** soutient par exemple le développement de méthodes de surveillance et d'évaluation de l'**usure thermomécanique** de composants en acier inoxydable exposés à un flux de neutrons. L'accent est mis en particulier

Raumkühlung durch **Erdwärmesondenfelder** entwickelt. Zur Wärme- und Kältenutzung von **Grundwasser** werden Richtlinien und ein neues Planungsprogramm erarbeitet.

Auch die **Windenergie** erfreut sich sehr hoher Wachstumsraten (2005 weltweit +24% oder +59 MW). Die **Rotorvereisung** an alpinen Standorten von Windkraftanlagen (WKA) wurde in Gütsch am laufenden Rotor untersucht und soll durch Nanobeschichtungen und anti-Frost-Proteine reduziert werden. Auch im Sommer wurden Eiswurfweiten bis 90 m gemessen. Die soziale **Akzeptanz** von WKA wird auch international analysiert. In diesem Zusammenhang wurden die Auswirkungen von WKA systematisch erfasst.

KERNENERGIE

Eine Vollkostenanalyse verspricht für die Kernenergie auch 2030 deutliche ökonomische Vorteile. Im Programm **Nukleare Sicherheit und Entsorgung** wurden die Auswirkungen menschlicher Eingriffsfehler an 16 Fallbeispielen quantifiziert. Weitere Untersuchungen mit starker internationaler Arbeitsteilung befassten sich mit dem Verhalten von Kernmaterialien, der Neutronenversprödung von Reaktordruckbehältern, der Entsorgung radioaktiver Abfälle sowie mit Elementen der **künftigen Reaktorgeneration IV**.

In der **Regulatorischen Sicherheitsforschung** wurden die Kenntnisse zur statischen und dynamischen Spannungsrisskorrosion sowie der thermomechanischen Ermüdung vertieft. Weitere Arbeiten befassen sich mit deterministischer Sicherheitsanalyse, Reaktorunfällen, Rohrleitungsversagen, dem Strahlenschutz sowie dem Transport und der Entsorgung radioaktiver Abfälle.

Ein Meilenstein auf dem Weg zur **kontrollierten thermonuklearen Fusion** ist die Unterzeichnung des Vertrags zum Bau des Experimentalreaktors **ITER** in Cadarache (FR). Ein wesentlicher Beitrag dazu war im Berichtsjahr die Inbetriebnahme des ersten 0.5 MW Gyrotrons zur Plasmaerhitzung. Die numerische Erfassung der Turbulenzen, die Entwicklungen von Diagnosemethoden und supraleitender Kabel sowie die Simulation einer 14 MeV Neutronenquelle sind weitere wesentliche Schweizer Beiträge zur internationalen Fusionsforschung.

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Ein Kostenvergleich für die wichtigsten Energieeffizienzmassnahmen für die wesentlichen Kategorien von **Wirtschaftsgebäuden** liefert praktische Handlungsempfehlungen. Die Motivation zu Gebäudesanierungsmassnahmen könnte durch ei-

sur la détection de signes d'usure, avant même le développement de fissures visibles.

Le troisième programme de recherche touchant au domaine nucléaire a pour but de développer les connaissances scientifiques et technologiques nécessaires à l'exploitation, à terme, de la **fusion thermonucléaire contrôlée** comme source durable d'énergie. En plus de sa participation au prototype international de réacteur thermonucléaire **ITER**, la Suisse, avec le PSI et sa *Swiss Spallation Neutron Source* (SINQ), étudie notamment les effets de la radiation sur les matériaux pressentis pour les composants structuraux du futur réacteur à fusion.

BASES DE L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE

Les problématiques d'ordre **économique, sociologique et politique** liées à la préparation, à la répartition et à l'exploitation des agents énergétiques font également l'objet de recherches. On étudie ainsi par exemple les **conséquences à long terme d'un niveau élevé du prix du pétrole**. Une étude montre que l'hypothèse d'un prix du baril de brut dépassant 100 USD n'est réalisée qu'à la condition de contraintes extrêmes. Alors que l'augmentation des prix du pétrole entraîne d'abord une diminution des émissions de CO₂, la **substitution** progressive des produits pétroliers par des combustibles et carburants dérivés du charbon représente une menace considérable pour le climat à plus long terme.

nen **Energieausweis für Gebäude** wesentlich verbessert werden. Trotz hoher Volatilität sind **Rohölpreise** über 100 \$/Fass auf absehbare Zeit unwahrscheinlich. Wärme aus **Holz** weist heute ähnliche Kosten auf wie Wärme aus Heizöl. Bei bestehenden **Nahwärmenetzen** könnten jährlich um die 500 GWh durch Holz und Umgebungswärme gedeckt werden. Eine **Öffnung des Erdgasmarktes** in der Schweiz würde nur bei gleichbleibender Versorgungssicherheit und einer Preisreduktion um wenigstens 20% begrüsst.

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM EFFIZIENTE ENERGIENUTZUNG IN GEBÄUDEN

Charles Filleux

filleux.ren@bhz.ch



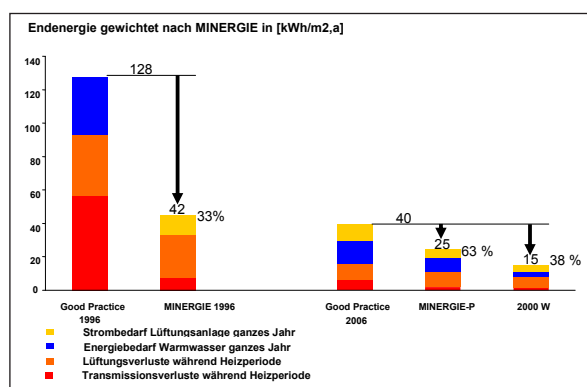
Pavillon mit VIP-Fassadenelementen

Der Einsatz von Vakuumisulationspaneelen (VIP) eröffnet wegen der geringen Dämmschichtdicken ein grosses Anwendungspotential in Hochbaukonstruktionen. Im bewohnbaren Pavillon wurden Fertigung, Konstruktion und Einbau eines VIP-Fassadenelementes getestet (Bild: Firma *Renggli AG*).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Hälfte des schweizerischen Primärenergieverbrauchs fällt auf die Gebäude: 27 % für Heizung, Raumklima und Warmwasser, 15 % für Elektrizität und etwa 8 % für die Herstellung und den Unterhalt.

Durch die Anwendung neuester technologischer Entwicklungen konnte in den letzten Jahren – vor allem bei neuen Gebäuden – der Primärenergieverbrauch deutlich gesenkt werden. Dennoch sind bei Neubauten weitere energetische Optimierungen mit einem geringeren CO₂-Ausstoss möglich. Die weiteren Schritte zur Reduktion des Primärenergieverbrauchs bei Neubauten werden vergleichsweise immer anspruchsvoller (Figur 1). Das grosse Energiesparpotenzial liegt heute jedoch bei der Erneuerung der bestehenden Gebäude.



Figur 1: Schritte zur Reduktion des Primärenergieverbrauchs in einem Geschäftshaus vor zehn Jahren und heute (Grafik Basler & Hofmann).

Um die ehrgeizigen Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft im Gebäudebereich mit Zielhorizont 2050 zu erreichen, sind verstärkte Anstrengungen notwendig. Das Forschungsprogramm setzt hauptsächlich auf Technologien, welche längerfristig ausgerichtet sind, ohne jedoch kurz- und mittelfristige Ziele zu vernachlässigen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

GEBÄUDEKONZEPTE / PLANUNGSWERKZEUGE

Die Bedeutung der bestehenden Gebäudesubstanz für eine nachhaltige Entwicklung ist unbestritten. Bis ins Jahr 2050 werden in der Schweiz über 90 % des Gebäudeenergiebedarfs durch Bauten verursacht, die vor dem Jahr 2000 erstellt wurden. Gleichzeitig weisen Altbauten gegenüber modernen Neubauten häufig ein grosses Defizit bezüglich Komfort und Zweckmässigkeit auf. Mit dem Projekt **Prefabricated Systems for Low**

Das Hauptgewicht der Aktivitäten des Forschungsprogramms basiert auf den Schwerpunkten:

- **Gebäudekonzepte:** 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.

- **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 «Elektrizität» durchgeführt.

- **Nachhaltige Quartierentwicklung:** Zusammen mit dem Bundesamt für Wohnungswesen und dem Bundesamt für Raumentwicklung sollen die Erfordernisse und Möglichkeiten einer nachhaltigen Quartierentwicklung anhand von vier typischen Problemquartieren exemplarisch untersucht werden. Es werden nicht nur die ökologischen sondern auch die wirtschaftlichen und sozialen Aspekte der Quartierentwicklung angegangen.

Energy Renovation of Buildings [1] will das Gebäudeforschungsprogramm der IEA Impulse geben, um die nachhaltige Wohnbauerneuerung zu fördern. Das Projekt wurde 2006 gestartet. Es beteiligen sich 10 europäische Länder mit Projektteams, in welchen sowohl Forscher, Planer und die Bauindustrie vertreten sind. In der Schweiz ist das Projekt in die Aktivitäten des CCEM (Competence Center for Energy and Mobility der ETH) eingebettet.

Der Anteil der Wohnbauten am Energieverbrauch der Schweiz beträgt rund 27 % (inkl. Elektrizität). Aus diesem Grunde wurde einem zweiten Projekt im Sanierungsbereich für Wohnbauten stattgegeben. Das von der Schweiz konzipierte Forschungs- und Demonstrationsprogramm **Advanced Housing Renovation by Solar and Conservation** [2] wurde im April 2006 im Rahmen des «Solar Heating & Cooling Implementing Agreement» der internationalen Energieagentur (IEA) gestartet. Im Dezember 2006 trafen sich Architekten und Gebäudetechnikplaner aus der ganzen Schweiz zwecks Erfahrungsaustausch, Bildung eines Netzwerks und Generieren erster Projektideen zu einem ersten Workshop.

Ende 2006 konnte der **Elektronische Bauteilkatalog** [3] abgeschlossen und aufgeschaltet werden. Der webbasierte und dynamische Bauteilkatalog ist der zeitgemässe Ersatz der SIA Dokumentation D 0123. Der Internet-Benutzer kann Bauteile, z.B. Zweischalenmauerwerk, aus dem Katalog auswählen und dynamisch die Ausführungsvariante durch das Ändern einzelner Materialien und Schichtdicken bestimmen. Per Mausclick werden U-Wert und ökologische Kennwerte berechnet und tabellarisch, sowie grafisch dargestellt. Diese online generierten Resultate stehen dem Anwender einerseits im PDF-Format zum Ausdrucken, sowie mittels XML-Schnittstelle auch elektronisch (*download*) für entsprechend ausgerüstete Software (SIA 380/1 etc.) zur Verfügung.

Unter www.bauteilkatalog.ch stehen dem Internet-Benutzer rund 120 Konstruktionen in ver-

schiedenen Ausführungsvarianten zur Verfügung (Figur 2).

Das Resultatblatt (Figur 3) enthält Daten/Berechnungsergebnisse zu folgenden Themen:

Material, Schicht: enthalten sind die wesentlichsten Materialien

Eco-devis Einstufung: integriert sind die eco-devis-Ergebnisse, in dem die «ökologisch interessanten» und «ökologisch bedingt interessanten» funktionalen Einheiten gekennzeichnet werden.

Wärmeleitfähigkeit: standardmässig werden die üblichen Materialwerte gemäss SIA D 0170, etc. verwendet

U-Wert Berechnung: Der U-Wert wird für homogene, sowie für einschichtig und 2-schichtig inhomogene Bauteile berechnet.

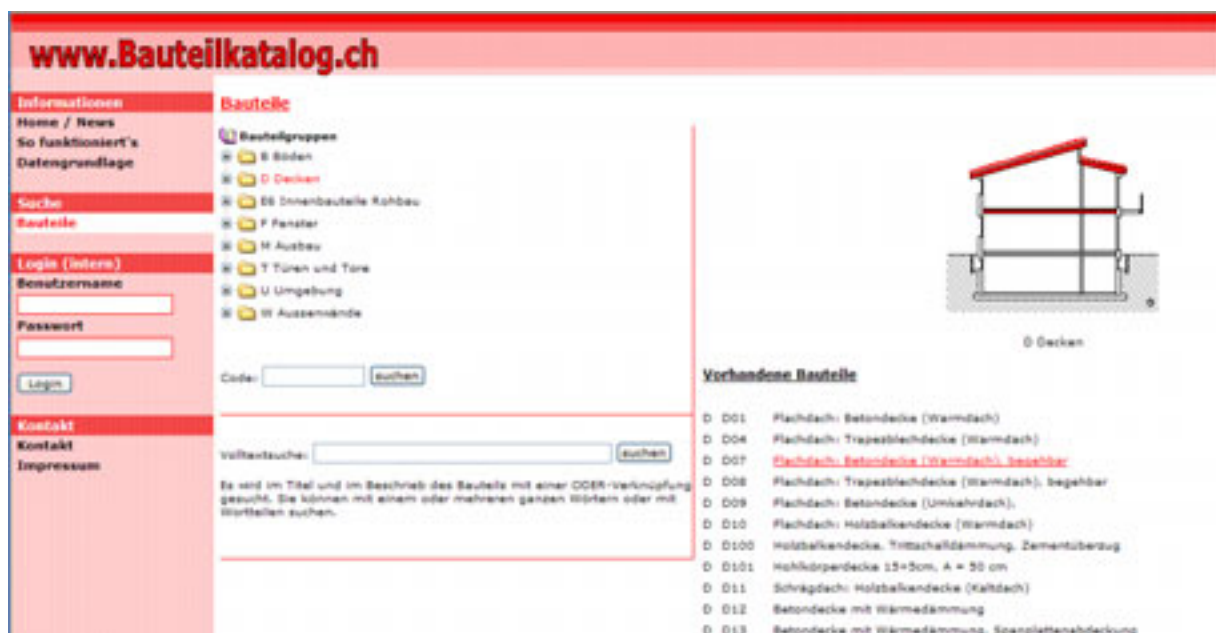
Lebensdauer: Standardisierte Materiallebensdauer (gemäss AFB-Lebensdauer)

Herstellung: Berechnung gemäss Baustoffdaten KBOB/eco-bau/IPB-Empfehlung 2007/1

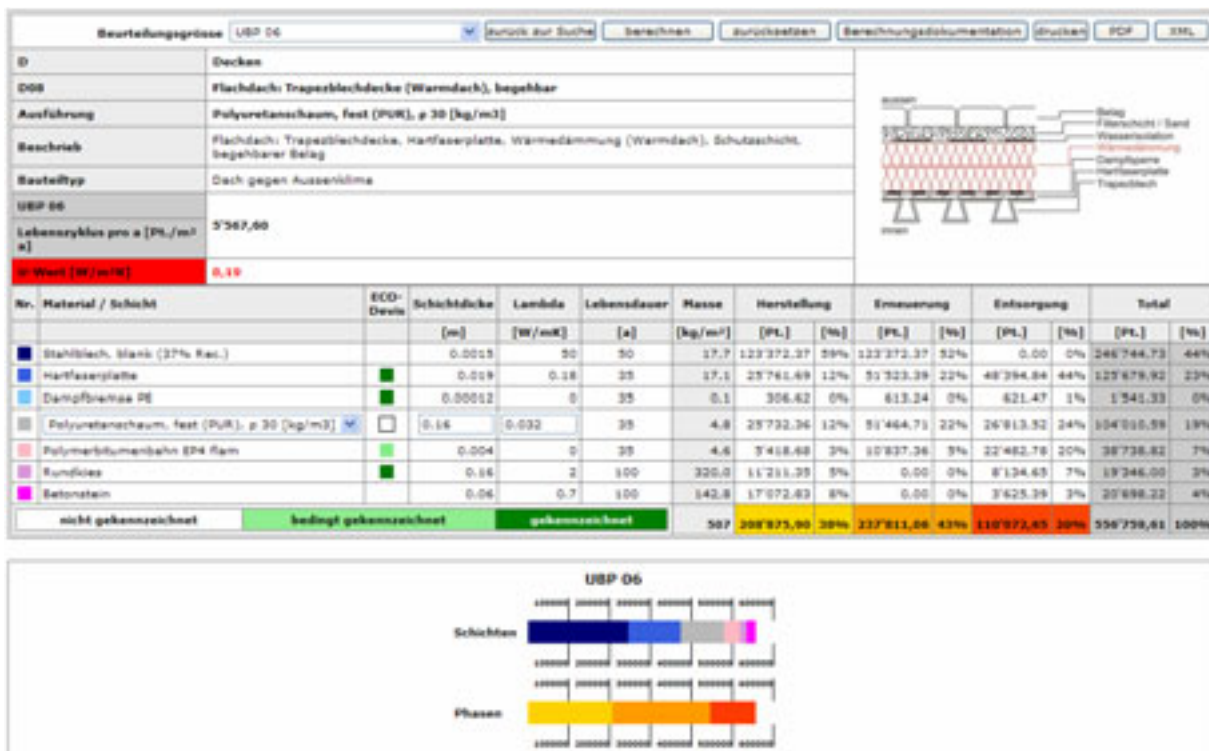
Erneuerung: Berechnung der theoretischen Anzahl der Ersätze der Schichten (Berechnung gemäss OGIP)

Entsorgung: Berechnung gemäss Baustoffdaten KBOB/eco-bau/IPB-Empfehlung 2007/1

Total: Gesamtbelastung des Bauteils bei einer Gebäudelebensdauer von 100 Jahren



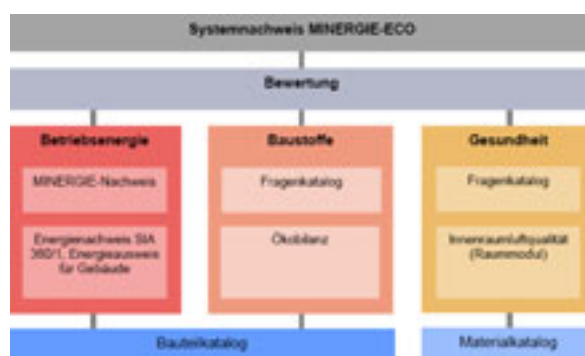
Figur 2: 120 Konstruktionen aus 8 Bauteilgruppen wählbar.



Figur 3: Das Beurteilungsschema enthält einerseits die entsprechenden Bauteilinformationen (Beschreibung, U-Wert etc.) sowie den Schichtaufbau (Materialisierung) des Bauteils.

Aufbauend auf dem elektronischen Bauteilkatalog wird nun - mit Unterstützung des Vereins *EcoBau* – **Minergie-Eco - Systemnachweis für nachhaltige Hochbauten** [4] entwickelt: Der Systemnachweis MINERGIE-ECO (eine Weiterentwicklung des bestehenden Gebäudelabels MINERGIE-ECO) dient als Instrument zur Beurteilung und Auszeichnung energetisch, gesundheitlich und bauökologisch vorbildlicher Bauten (Figur 4). Ein Ziel des Projekts ist eine quantitative Bewertung von Gebäuden, die den MINERGIE-Nachweis, eine Ökobilanz und ein Raummodul umfasst. Weiter wird der Energieausweis für Gebäude gemäss der Europäischen Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) in die Methodik integriert. Als Produkt entstehen Softwarebausteine (DLLs), die in die verbreiteten Computerprogramme zur Energieberechnung von Gebäuden integriert werden können. Die Arbeiten im Jahr 2006 umfassten die Fertigstellung der Konzeptphase sowie den Beginn der Detailausarbeitung in den einzelnen *Workpackages* (WP).

In frühen Projektphasen sind bei Nicht-Wohnbauten oft differenzierte Analysen zu Heiz- und Kühllasten notwendig. Hier setzt ein Planungshilfsmittel basierend auf der **Klimaflächenmethode** [5] an. Mit erheblicher Verzögerung konnte das Planungshilfsmittel nun fertig gestellt werden. Es wird im Rahmen der Vorlesungsreihe «Spezialfragen der Bauphysik» im Januar 2007 einem interessierten Publikum vorgestellt.



Figur 4: Nachweisverfahren mit gesamtheitlicher Beurteilung von Energieeffizienz, Umweltbelastung und Gesundheitsaspekten von Gebäuden.

Mit der neuen Programmversion **HELIOS-XP** [6] liegt ein Planungshilfsmittel vor, welches einen leichten Einstieg in die dynamische Gebäudesimulation ermöglicht. Das Programm deckt im Besonderen den Anwendungsbereich des thermischen Verhaltens von Gebäuden mit grossen Solargewinnen oder internen Lasten ab und erlaubt die Untersuchung des Nutzenergiebedarfs für Heizen und Kühlen und des thermischen Komforts. In der Handhabung unterscheidet sich der Aufwand für die Dateneingabe nicht von einem stationären Bilanzverfahren wie z.B. SIA 380/1. Das Gebäudesimulationsprogramm HELIOS-PC, welches seit 1992 als DOS-Version im Einsatz steht, wurde auf die neue WINDOWS-Plattform

XP transferiert. Die Verwendung einer ACCESS-Datenbankstruktur für alle Projektdaten ermöglicht die einheitliche Einbindung von Daten für Baustoffe, Verglasungen, Lastprofilen, etc. und verbessert damit den Benutzerkomfort. Das Rechenprogramm basiert auf einem thermischen Einzonnenbilanzmodell. Es wurden folgende zusätzliche Berechnungsmodule eingebaut: Der Luftaustausch durch thermischen Auftrieb durch Fugen oder Fensteröffnungen, die mechanische Lüftung mit oder ohne Wärmerückgewinnung, die Erfassung der linien- und punktförmigen Wärmebrücken, ein vereinfachtes Modell für den Wärmeverlust ins Erdreich, die Ermittlung der dynamischen Kennwerte von Bauteilen, ein detaillierter Rechenansatz für die Modellierung des Wärme- und Strahlungsdurchganges bei Verglasungen mit Lamellenstoren und die Möglichkeit der freien Definition von stündlichen Last- und Lüftungsprofilen sowie von Temperaturrandbedingungen an Bauteiloberflächen.

Die Validierung der Gebäudesimulationsprogramme ist für deren erfolgreichen Einsatz unabdingbar. Bis heute fehlen empirische Validierungssatzsätze, vor allem im Bereich Modellierung der solaren Gewinne. Im Rahmen des Projekts **Empirische Validierung von Gebäudesimulationsprogrammen (IEA/SHC Task 34)** [7] wurde mit Hilfe einer Serie von Testzellenexperimenten ein solcher Datensatz erarbeitet und die Modellierung der solaren Gewinne durch Fenster - mit oder ohne Beschattung - in ausgewählten Simulationsprogrammen überprüft. Der erarbeitete Datensatz wurde derart aufbereitet, dass auch Programmentwickler und weitere interessierte Kreise diesen verwenden können. Validiert wurde u.a. auch das Programm **IDA – ICE** [8].

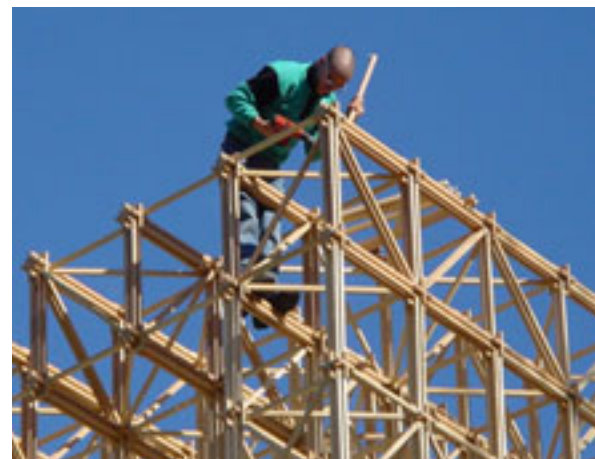
Während der Nutzungsdauer heute erstellter Bauten wird sich im Sommer die durchschnittliche Lufttemperatur im europäischen Alpenraum um schätzungsweise 2 bis 3 K erwärmen. Häufigere und längere Hitzeperioden erfordern einen besseren Schutz vor Aussenlasten, geringere interne Lasten sowie eine angepasste Kühlung der Gebäude. Können wir ein angenehmes Raumklima ohne erhöhten Stromverbrauch anbieten? Wie ist dies in der Erarbeitung unserer Normen zu berücksichtigen? Diesen Fragen geht das Projekt **Bauen, wenn das Klima wärmer wird** [9] nach.

GEBÄUDEHÜLLE

Eine Vielzahl von Wandsystemen, die speziell für Häuser mit niedrigstem Energieverbrauch entwickelt wurden, ist bereits heute auf dem Markt erhältlich. Im Buchprojekt **Innovative Wandkonstruktionen für Minergie-P und Passivhäuser**, abgeschlossen 2006 (Figur 5), werden ausgewählte, innovative Wandkonstruktionen in Leicht- und Massivbauweise beschrieben und jeweils anhand eines realisierten Beispiels illustriert (Fi-



Figur 5: Innovative Wandkonstruktionen.



Figur 6: Das dreidimensionale Fachwerk aus Holzstäben und Holzknotten wird mit Zelluloseflocken ausgeblasen und bildet eine rundum wärmebrückenfreie Gebäudehülle für Wände, Boden und Dach (Bild: David Muspach).

gur 6). Die systematische Beschreibung erlaubt einen Quervergleich bezüglich Energie, Ökologie, Wirtschaftlichkeit und bauphysikalischer Eigenschaften.

Im Hochbau werden zunehmend Vakuumisoliationspaneele (VIP) auf der Basis eines mikroporösen Kernmaterials mit niedrigem Innendruck und gasdichter Hülle eingesetzt. Die niedrige Wärmeleitfähigkeit ermöglicht geringe Dämmschichtdicken und eröffnet somit ein grosses Anwendungspotenzial für neue architektonische Lösungen im Niedrigenergie- und Sanierungsbe-

reich. Nach der Erarbeitung von Grundlagen zu Materialeigenschaften, Alterungsverhalten und Anwendungstechnik werden nun unter massgebender Beteiligung der Industrie verschiedene Bauanwendungen mit VIP-Isolation untersucht:

Im Projekt **Entwicklung eines VIP-Passivhausfassadenelements** [10] werden u.a. Fertigungsabläufe in der Produktionshalle untersucht und optimiert. Die konstruktive Lösung weist bezüglich der Wärmebrückenproblematik noch Mängel auf, die es zu beheben gilt, will man den Minergie-P Standard erreichen. Der erstellte Pavillon (siehe Titelbild) dient u.a. der Erfolgskontrolle und wird messtechnisch ausgewertet. In einem weiteren Projekt **Bauelemente und Systeme mit VIP für Aussenwand und Dach** [11] wurde parallel an der Verbesserung der Bautaughkeit der Paneele, verschiedenen Konstruktionsvarianten für vorgehängte hinterlüftete Fassaden und einem System für die Innendämmung von Aussenwänden bestehender Gebäude gearbeitet. Die Optimierung der konzipierten Bausysteme wurde durch Berechnung der Wärmebrücken und des statischen Verhaltens, die Erstellung von Arbeitsmodellen und Prototypen durchgeführt. Im weiteren Projektverlauf konzentriert sich die Bearbeitung auf ein flexibles Distanzschrauben-System für vorgehängte hinterlüftete Fassaden (Figur 7).



Figur 7: Ansicht der Testmontage des Distanzschrauben-Systems, vor der Montage der Aussenschale (FHNW)

Im Projekt **Entwicklung eines kompakten Fussbodenheizungselements mit integrierten VIP** [12] soll ein kompaktes Fussbodenheizungselement entstehen (Figur 8), welches die Vorteile von VIP nutzt und die Nachteile minimiert. Das VIP wird dabei in kontrollierten Abläufen in ein modulares FBH-Fertigelement (Weiterentwicklung des heutigen R25-FHB-Systems der Tobler AG) eingebaut. Damit wird es gegen mechanische Verletzungen beim Einbau auf der Baustelle vollständig geschützt.

Im Rahmen des Projekts **Weiterentwicklung, Qualitäts-Sicherung und Langzeitverhalten**



Figur 8: Schnitt durch ein einbaufertiges FBH-VIP-Element, totale Aufbauhöhe 51 mm (Bildquelle: Tobler AG).

von Vakuumisulationspaneelen mit mechanischem Schutz (Vacucomp) [13], wurde die Bodendämmung des Kühl-/Tiefkühlraums im Neubau «Forum Chriesbach» der EAWAG in Dübendorf teilweise mit VIP erstellt und instrumentiert (Figur 9). Neben Temperatur- und Feuchtemessstellen wurden erstmals in dieser Anwendung spezielle Sensoren installiert, welche die Messung des Gasdrucks in den eingebauten VIP unter dem Unterlagsboden ermöglichen. Erste Resultate der Innendruckmessungen liegen nun vor, welche die Qualität der VIP-Konstruktion bestätigen. In einer zweiten Langzeitstudie werden im Jahr 2004 gestartete Messungen an einer Flachdachkonstruktion in Regensdorf weiter geführt. Zur Innendruckmessung werden VIP ausgebaut und nach der Messung im Empa-Labor in Dübendorf wieder eingebaut. Die Zweijahresdaten zeigen die intakte Funktion der VIP-Dämmung. Es lassen sich Alterungseffekte beobachten, welche aufgrund von Laborversuchen und Modellberechnungen näherungsweise erwartet worden sind.

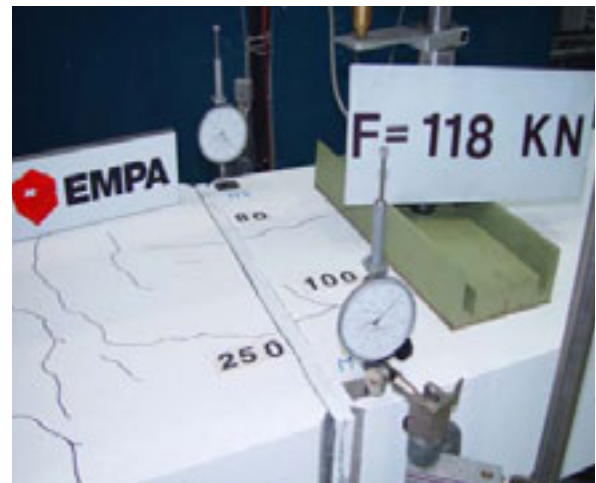
Konstruktiv bedingte Durchdringungen der Gebäudehülle und ihrer Wärmedämmschicht, wie sie z.B. bei Balkonplatten anzutreffen sind, stellen Wärmebrücken dar. Deren Wärmestrom von innen nach aussen gilt es zu minimieren. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt werden bei den am Markt üblichen Thermotragelementen zur Schnittkraftübertragung Edelstahl und als Wärmedämmmaterial Steinwolle, Phenolharzschaum usw. verwendet. Das Projekt **Thermotragelemente (TTE) aus hochfestem Faserverbundstoff und integrierten Vakuumisulationspaneelen (VIP)** [14] beinhaltet die Optimierung eines bereits vorliegenden Prototyps eines Thermotragelementes (Figur 10), bei dem zur Schnittkraftübertragung Glasfaserkunststoffstäbe und als Wärmedämmung Vakuumisulationspaneele eingesetzt werden. In Laborexperimenten an der EMPA werden Korrosionsbeständigkeit und Tragfähigkeit des TTE untersucht (Figur 11). Mittels thermischer Simulation soll das Element optimiert werden.



Figur 9: Neubau EAWAG Forum Chriesbach auf dem Empa-Areal in Dübendorf (links), Lage der Kühlräume mit VIP-Bodenkonstruktion im Untergeschoss (rechts).



Figur 10: Thermotragelemente (TTE) aus hochfestem Faserverbundstoff und integrierten Vakuumisulationspaneelen.



Figur 11: Beim Prüfkörper TTE «Q» D18 MM wurde eine maximale Querkraft von $Q = 124.2 \text{ KN}$ erreicht. Das maximale Moment betrug $M = 36.63 \text{ KNM}$.

Die sommerliche Überhitzung von Gebäuden ist in den letzten Jahren zu einem Problem geworden. Dabei spielen die heutigen architektonischen Trends mit grossflächig verglasten Fassaden sowie der Klimawandel mit seinen extremer werdenden Wetterlagen und steigenden Durchschnittstemperaturen eine zentrale Rolle. Durch die Entwicklung neuer Glasbeschichtungen für den sommerlichen Wärmeschutz soll zur Lösung dieses Problems ein Beitrag geleistet werden. **Neue optische Beschichtungen für transparente Gebäudeteile im Hinblick auf einen verbesserten sommerlichen Wärmeschutz** [15]: Der neue Ansatz besteht aus einer spektralen Transmissionsfunktion, welche das Verhältnis des Strahlungstransmissionsgrades τ_e zum Lichttransmissionsgrad τ_v minimiert. Dadurch kann die Wärmebelastung durch die Sonnenstrahlung gegenüber den besten aktuellen Sonnenschutzgläsern um einen Drittel gesenkt werden. Die in diesem Projekt neu entwickelten Sonnenschutzgläser (M-Gläser) sollen

sich bezüglich Farbneutralität und Helligkeit nicht von den aktuellen Produkten unterscheiden. Bei der Entwicklung wird darauf geachtet, dass die Materialwahl und die vorgesehenen Produktionsverfahren mit den heute verwendeten Herstellungsprozessen kompatibel sind. Ebenfalls mit der Tageslichtnutzung setzt sich das Projekt **High performance Integrated Lighting Systems (Green lighting)** [16] auseinander. In diesem Projekt suchen die Forscher an der EPFL nach einer ausgewogenen Aufteilung der natürlichen und künstlichen Beleuchtung von Räumen. Das Projekt stellt den schweizerischen Beitrag zum IEA-Projekt «Energy Efficient Electric Lighting of Buildings» dar.

GEBÄUDETECHNIK

Im Gebäudebereich sinkt der Wärmebedarf (insbesondere der Heizwärmebedarf), der Strombedarf steigt jedoch weiterhin. Auf der Versorgungsseite sollen hochwertige, nicht erneuerbare

Energieträger in Zukunft nicht ohne Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) genutzt werden. Je nach Art der Stromerzeugung kann es von Vorteil sein, den Restwärmebedarf in Niedrigenergiegebäuden durch Mikro-Blockheizkraftwerke (Mikro-BHKW) zu decken. Brennstoffzellengeräte für die Hausenergieversorgung stehen dabei im Vordergrund. Bei Einsatz von erneuerbaren gasförmigen Energieträgern (Gas aus Biomasse) stellen sie auch eine Möglichkeit der nachhaltigen Gebäudetechnik dar. Brennstoffzellensysteme stehen dabei in einem kompetitiven Umfeld zu anderen Mikro-BHKW Geräten und zu den bestehenden, traditionellen Heizsystemen wie Brennwertkessel oder Wärmepumpen. Unter **Building Integrated Fuel Cell and other Cogeneration Systems** [17] läuft ein mehrjähriges IEA-Projekt mit Schweizer Beteiligung.

Die Gebäudekühlung hat weiterhin an Aktualität gewonnen. 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** [18] wird die Möglichkeit geprüft See- und Grundwasser über ein Kältenetz zur Kühlung von Gebäuden zu nutzen. Die erste Phase des Projekts zeigt eine Übereinstimmung zwischen örtlicher Nachfrage und Angebot. Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden können traditionell für Heizung und Warmwasserproduktion eingesetzt werden oder darüber hinaus zur Wärmeabfuhr aus dem Gebäude mit Hilfe der Fussbodenheizung. Dies kann entweder passiv über eine Erdsonde geschehen oder aktiv bei simultanem Heiz-/Kühlbetrieb. Mit dem Projekt **Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen** [19] sollen Fragestellungen zu sinnvollen Hydraulikschaltungen, zur Dimensionierung und zum optimalen Regelkonzept beantwortet werden.

Vier weitere Projekte befassen sich mit der energieeffizienten Bereitstellung von Kälte. Im Projekt **Open absorption system for cooling and air conditioning using membrane contactors** [20] kann nun nach der Lösung der materialtechnischen Fragen mit dem Bau eines Prototypen für Zweistrom- bzw. Dreistromsorptions-Kühlelementen begonnen werden. **Hocheffiziente Kühltssysteme für Gebäudesanierungen** [21]: Projektziel ist es, durch Aufzeigen von innovativen Systemlösungen sowie deren Integration im Rahmen von Sanierungen, der Verbreitung hocheffizienter Kühltösungen gegenüber konventionellen Lösungen mit handelsüblichen Kältemaschinen Vorschub zu leisten. Das Projekt ist 2006 gestartet worden. Natürliche Kältesenken wie die Aussenlufttemperatur zur Nachtzeit können für die Gebäudekühlung genutzt werden. Dabei kommt es auf die Summe der Grad-Stunden zwischen Aussenluft- und Innenlufttemperatur an. Dieses **«Climatic Cooling Potential (CCP)»** wurde im Pro-

jekt **Passive cooling by night-time ventilation using climate responsive elements** [22] für verschiedene Klimata systematisch untersucht. Für unsere klimatischen Verhältnisse im schweizerischen Mittelland wird ein CCP von ca. 80 Kh benötigt um eine Last von 50 W/m² abzuführen. Die Forscher wenden sich auch der Anhebung der nächtlichen Temperaturen bei Klimaerwärmung zu. Die Folge ist eine Reduktion des CCP. Trotz allem soll die nächtliche Gebäudeauskühlung weiterverfolgt werden. Einen ähnlichen Weg geht das Projekt **Coolshift – Système de rafraîchissement par ventilation déphasée** [23]. Hier wird eine Speichermasse mit Nachtluft durchströmt und so eine Phasenverschiebung erzeugt. Auch dieses Verfahren reagiert auf die Klimaerwärmung sensibel.

Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte für Komfortlüftung [24]: In den letzten Jahren wurden vermehrt Kompaktlüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung und Abluftwärmepumpe in MINERGIE-P® – und Passivhäusern eingesetzt. Die bestehenden Normen und Richtlinien für die Geräteprüfungen werden dieser Art von Kompaktlüftungsgeräten nur schlecht gerecht. An der Hochschule für Technik+Architektur Luzern wurde deshalb ein Entwurf für ein Prüfreglement ausgearbeitet, das die Ansprüche an solche Geräte, speziell auch die akustischen Aspekte, vollständig abdeckt. Aufgrund dieses Prüfreglementes wurde der Prüfstand geplant und an der HTA Luzern aufgebaut (Figuren 12 und 13). Das Hauptziel ist eine technisch vollständige Geräteprüfung an Kompaktlüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung und Wärmepumpe mit vertretbarem finanziellem Aufwand. Nebst den thermischen und strömungstechnischen Messungen werden auch Schallmessungen durchgeführt. Im Berichtsjahr konnten mehrere Produkte erfolgreich geprüft werden.

In verschiedenen Erfolgskontrollen an Niedrigenergiegebäuden wurden tiefe Raumlufffeuchten registriert. Benutzer und Planer reagieren darauf



Figur 12: Ansicht Prüfstand an der HTA Luzern.



Figur 13: Akustikkabine für Aufstellung der Prüflinge.

mit dem Einsatz von zentralen oder dezentralen Dampfluftbefeuchtern. Der Einsatz dieser Geräte wirkt sich negativ auf die Primärenergiebilanz von Niedrigenergiebauten aus. Das Ziel im Projekt **Feuchte in Niedrigenergiebauten** [25] ist das Aufzeigen der Möglichkeiten zur Minimierung des Energieverbrauchs unter Einhaltung einer ausreichenden Raumlufftfeuchte im Wohnbereich. Es sollen Alternativen zur zentralen und dezentralen Dampfluftbefeuchtung aufgezeigt werden. Diese sind im Wesentlichen die Feuchterückgewinnung und die Anwendung bedarfsgeregelter Zuluft-Volumenströme. Die Bewertung der drei Strategien Dampfluftbefeuchtung, Feuchterückgewinnung und bedarfsgeregelte Luftvolumenströme erfolgt nach den Kriterien Energie, Hygiene und Komfort. Ergänzend zu diesen Untersuchungen wird im Projekt **Feldvergleich von Wärme- und Enthalpieübertragern in Kompaktlüftungsgeräten** [26] die Feuchterückgewinnung durch moderne Kompaktlüftungsgeräte, welche mit Wärme- und Feuchteübertragung auf dem Markt angeboten werden, an zwei Objekten im Feldeinsatz untersucht. Beide Projekte werden durch die Hersteller von Kompaktlüftungsgeräten unterstützt.

Zwischen 6 und 8% des gesamten Elektrizitätsverbrauchs entfallen in der Schweiz auf die Hilfsenergie für die Gebäudetechnik. Die Einsparpotenziale sind beträchtlich und können mit verhältnismässig geringem Aufwand erzielt werden. Genau dies wird in den Projekten **Internetbasierte Einstellung von Zeitsteuerungen haustechnischer Anlagen** [27] und **Nachrüstung von Beleuchtungen mit Bedarfssteuerungen** [28] untersucht. Die Lüftung von Schulzimmern wird immer wichtiger, da hohe Leistungen und Ar-

beitskonzentration erwartet werden. Aus diesem Grunde werden im Projekt **Elektrizitäts- und Wärmeeinsparungen durch CO₂-gesteuerte Lüftungen in Schulbauten** [29] verschiedene Schulzimmer, welche mit Präsenzfühler oder mit CO₂-Fühler ausgerüstet sind bzw. natürlich belüftet werden, bezüglich Raumlufftqualität und thermischem Komfort untersucht. Die Messungen werden von Umfragen bei der Lehrerschaft begleitet.

Mit der Entwicklung einer hocheffizienten Schwefeldampflampe gehen die Forscher an der Hochschule Yverdon neue Wege: **Environmental friendly high efficient light source** [30]. Dank der Weiterentwicklung des Modulators sowie der Verringerung der Leistungsaufnahme erhofft man sich eine grössere Marktakzeptanz, eine Erhöhung der Lebensdauer und die Senkung der Herstellungskosten. Bei einem Drittel der Leistungsaufnahme der Solar-1000 Lampe, beträgt die Leuchtkraft durch den Einsatz des Modulators nun 68 lm / W.

Im Projekt **Wachstumsregulation von Legionella pneumophila in Biofilmen und Amöben** [31] ging es darum, neue Ansätze zur Verhinderung von Legionellen in Trinkwassersystemen zu erforschen, um die energieaufwändige thermische Desinfektion dereinst zu ersetzen. Dabei wurde die Bildung oder Besiedlung von Biofilmen durch Legionellen im Flusskammer-System untersucht. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie liefern Evidenzen, dass sich auch unter günstigen Wachstumsbedingungen Legionellen hauptsächlich in der Flüssigkultur (oder in Amöben) und nicht an Oberflächen (oder in Biofilmen) vermehren. Eine erfolgreiche Bekämpfung von Legionellen in Wassersystemen scheint trotzdem möglich zu sein, wenn Biofilme und Amöben ebenfalls eliminiert werden.

NACHHALTIGKEIT IN GEBÄUDE UND QUARTIER

Ein mehrjähriger Schwerpunkt des Programms liegt in der Erarbeitung und Umsetzung von Strategien für eine **nachhaltige Quartierentwicklung**. Dazu arbeiten das Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), das Bundesamt für Wohnungswesen (BWO) zusammen mit dem BFE in vier Schweizer Städten mit lokalen Behörden und Institutionen zusammen um Quartierentwicklungsprojekte durchzuführen resp. Hilfsmittel für die nachhaltige Entwicklung auf Quartierebene bereit zu stellen. Die verschiedenen Projekte wurden durch **No-vatlantis** [32], der ETH-Plattform für nachhaltige Entwicklung, koordiniert und begleitet. Im Projekt in **Basel** [33] wurden drei Hilfsmittel erarbeitet: (a) ein **Lehrpfad Nachhaltigkeit**, (b) ein Musterdokument **Vereinbarung Nachhaltigkeit**, mit welchem Hausbesitzer oder Liegenschaftsverwaltungen mit ihrer Mieterschaft eine kooperative

und für beide Seiten vorteilhafte, nachhaltige Liegenschaftsnutzung vereinbaren können und (c) ein Instrumentarium **Toolbox nachhaltiges Wohnen** für Liegenschaftsverwaltungen. In **Lausanne** [34] ging es um Anreize für den Gebäudeunterhalt im genossenschaftlichen Wohnungsbau im Vergleich zum freitragenden Wohnungsmarkt im Quartier **Bellevaux**. In **Luzern** [35] wurde für das Pilotquartier Basel-/Bernstrasse Luzern ein Planungsinstrument erarbeitet. Ebenso wichtig war die Erprobung der Organisationsstruktur im **Partnerschaftsprojekt** bestehend aus der Fachhochschule Zentralschweiz und der Stadt Luzern. Im Projekt **Zürich** [36] wurden eine Checkliste und der **retrofit advisor** erarbeitet, welche als Hilfestellung für den Entscheid Abbruch/Neubau gegenüber Sanierung gedacht sind. Alle vier Projekte konnten im Berichtsjahr abgeschlossen werden. An zwei Veranstaltungen sollen 2007 die Ergebnisse einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt werden.

Im Berichtsjahr wurden zwei Projekte zum Thema «Ressourcenrelevante Typisierung städtischer und ländlicher Wohnsiedlungen oder Quartiere unter Einbezug von Siedlungsinfrastruktur und siedlungsinduzierten Verkehrsleistungen» gestartet: **Energieaspekte städtischer Quartiere und ländlicher Siedlungen** [37] sowie **Aspects énergétiques des quartiers urbains et des agglomérations rurales dans le canton de Neuchâtel** [38].

Basierend auf der Ökoinventar-Datenbank (www.ecoinvent.ch) wurde in der Studie **Umweltwir-**

kungen von Gebäudestandards: Perspektiven für den Gebäudepark Schweiz [39] das Zusammenwirken von Energiestandards mit der Entwicklung des Gebäudeparks aufgezeigt und die resultierenden Umweltauswirkungen mit Hilfe von Ökobilanzierungen quantifiziert. Berücksichtigt wird der ganze Lebenszyklus der Bauten, d.h. die baulichen Aufwendungen, der Betrieb sowie die Entsorgung bzw. der Rückbau. Basierend auf den Ergebnissen der Ökobilanzen wurden die nötigen Anforderungen an zukünftige Standards für Neubauten sowie für Umbauten/Sanierungen, bezogen auf zu erreichende Ziele für die Umweltauswirkungen des Gebäudeparks Schweiz, formuliert. Es hat sich gezeigt, dass die aus den Untersuchungen ableitbaren Anforderungen an die zukünftigen Energiestandards stark von den anvisierten Zielsetzungen im energiepolitischen Gesamtkontext der Schweiz abhängen. Im Projekt **Die Wirkung von MuKen, Minergie und MinergieP** [40] wird eine Simulationsmethode erarbeitet, die es erlaubt auf der Basis von Kostensätzen, die in anderen Projekten ermittelt wurden, die Differenzkosten von ausgeführten Objekten zu berechnen, welche zu einer Ausführung in einem hypothetischen, anderen Standard bestehen. Das neueste Projekt zu diesem Schwerpunkt **Ökologische Bewertung neuer WKK-Systeme und Systemkombinationen** [41] verfolgt folgende Ziele: die technische und ökologische Bewertung verschiedener WKK-Systeme und Systemkombinationen.

Nationale Zusammenarbeit

Von den laufenden 41 vom BFE unterstützten Forschungsprojekten wurden 9 Projekte mit Beteiligung von **Fachhochschulen**, 13 Projekte mit Beteiligung von **ETH-Instituten und Universitäten** und 10 Projekte mit Beteiligung der **Industrie** durchgeführt. An 20 Projekten waren planende **Architektur- und Ingenieurbüros** beteiligt und in 7 Projekten wurde mit **Branchenverbänden** und **Agenturen** zusammengearbeitet.

Eine erfolgreiche Zusammenarbeit besteht mit dem **energie-cluster** (www.energie-cluster.ch) im Rahmen der beiden Arbeitsgruppen Vakuumisolationspaneele (VIP) [10, 11, 12, 13] sowie Komfortlüftung [24, 25, 26].

Programmübergreifende Projekte gibt es mit dem Forschungsprogramm **Elektrizität**. Mit den Programmen **Solarwärme** und **Energiewirtschaftliche Grundlagen** existieren Absprachen. Eine weitere Projektkoordination und gemeinsame Projektdurchführungen findet mit den Bundesämtern

ARE und **BWO** auf dem Gebiet der nachhaltigen Quartierentwicklung statt [32, 33, 34, 35, 36]. Dadurch, dass diese Projekte durch **Novatlantis** koordiniert werden, wird auch der Kontakt zu den Anstrengungen der ETHZ auf dem Gebiet der Nachhaltigkeit gepflegt.

Gemeinsame Projekte im Bereich *nachhaltiges Bauen* werden auch mit den Vereinen *Ecobau* [4] und *MINERGIE* resp. dem Hochbauamt der Stadt Zürich durchgeführt.

Der Kontakt zum nationalen Kompetenznetzwerk **brenet** (*Building and Renewable Energies Network of Technology*, www.brenet.ch) wird durch die Aufnahme von dessen Geschäftsführer in die Begleitgruppe des Programms wahrgenommen. Das Forschungsprogramm ist mit einem mehrjährigen Projekt [1] **Competence Center for Energy and Mobility (CCEM)** des ETH-Bereichs beteiligt.

Internationale Zusammenarbeit

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

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 an folgenden Projekten engagiert:

- **Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools** [6, 7]
- **High performance thermal insulation systems** [2]
- **Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems** [17]

- **Energy Efficient Electric Lighting for Buildings** [30]
- **Solar & Conservation Renovation of Housing** [2]
- **Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Buildings** [1]

2006 hat die Schweiz erstmals an *Workshops* des *European Research Area Networks* für Gebäude **ERABUILD** (FP6_515790) teilgenommen. ERA-BUILD verbindet Programmverantwortliche aus den verschiedenen Mitgliederstaaten und verfolgt das Ziel gemeinsamer Forschungsausschreibungen.

Verschiedene Forscher haben an internationalen Konferenzen mit Beiträgen teilgenommen (für eine Auswahl vgl. Referenzen [44, 45, 46, 47, 48]).

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Rahmen des Forschungsprogramms werden keine neuen Pilot- und Demonstrationsprojekte mehr gestartet. Das Schwergewicht liegt auf dem Abschluss der bereits genehmigten Projekte.

Das Projekt **Wattwerk – 1. Plusenergie-Gewerbehaus** [42] in Bubendorf BL erhielt 2004 den europäischen Solarpreis in der Kategorie *Betriebe und Unternehmen*. Das Gebäude soll mehr Energie produzieren als es verbraucht. Der Schlussbericht ist 2006 erschienen. Informationen sind unter www.wattwerk.ch zu finden.

Das Projekt **SOLARIX-Wandheizsystem** [43] verwendet eine neu entwickelte Solarfassade mit transparenter Wärmedämmung TWD (aussen) und vorfabrizierten Betonelementen (innen). *Solarix* vereinigt ein Heiz- und Kühlsystem mit folgenden Komponenten: Wandflächen mit Absorbern hinter den TWD-Fassaden, hydraulisches System zur Bodenheizung, Speicher resp. Erdregister, Steuerung der Kreise für den Heiz- und Kühlfall. Das Pilotprojekt dauert noch bis 2008.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Am 1. März 2006 ist die Leitung des Programms von Mark Zimmermann an den neuen Programmleiter übergegangen. Dank sorgfältiger Begleitung und grosszügiger Unterstützung durch Mark Zimmermann bei der Übernahme und Einarbeitung konnte das Programm ohne nennenswerten Unterbruch weitergeführt werden. Herzlichen Dank meinem Vorgänger!

Mit dem Wechsel der Programmleitung wurde auch die Begleitgruppe neu besetzt. Diese setzt sich neu zusammen aus Frau Giuse Togni giuse.togni@eteam.ch, Dr. Peter Schwehr pschwehr@hta.fhz.ch, Dr. Dario Aiulfi dario.aiulfi@sorane.ch, und Herr Mark Zimmermann mark.zimmermann@empa.ch. Das Programm erhält zudem eine neue Internet-Adresse [49], operativ ab Frühjahr 2007.

Für die Programmschwerpunkte der laufenden Periode 2004 bis 2007 haben sich insbesondere an den Fachhochschulen eigentliche Kompetenz-

zentren herausgebildet. Diese erfreuliche Entwicklung sichert eine gewisse Kontinuität in der Bearbeitung der Themen und fördert die Effizienz in der Bearbeitung der Forschungsprojekte.

Für das Jahr 2007 setzen wir auf Kontinuität mit einem fließenden Übergang zu den neuen Schwerpunkten. Während die Förderung der nachhaltigen Quartierentwicklung mit der Durchführung zweier Tagungen und der Publikation einer dritten Broschüre in die Umsetzung überführt wird, wird dem Thema Gebäudesanierung eine grössere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Im Berichtsjahr wurde die Vorbereitung des Konzepts der Energieforschung 2008 – 2011 aufgenommen. Für das Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden wurden in Zusammenarbeit mit dem Bereichsleiter und der Begleitgruppe folgende Schwerpunkte vorgeschlagen:

- Optimierte Gebäudekonzepte für eine 2000 Watt-Gesellschaft (Erhaltung der architektonischen Gestaltungsvielfalt, passive Sonnenenergie- und Tageslichtnutzung);
- Hocheffiziente Wärmedämmungen unter Einbezug von Vakuumisolation für Neubauten und Sanierungen;
- Verglasungen mit optimierter Energie- und Lichttransmission, Vakuumverglasung etc. (*Advanced glazing technology*);
- Alternative Kühlkonzepte für Niedrigenergiebauten (sanfte Kühlung, erdgekoppelte Wärmepumpen etc.);
- Steigerung der Energieeffizienz von Stromverbrauchern in Gebäuden (Haustechnik, Gebäudeautomation, etc.);
- Wärme- und Feuchte-Rückgewinnung in Gebäuden;
- Konzepte zur Integration von Solarenergie für die Wassererwärmung, Heizung und Kühlung);
- Konzepte, Technologien und Planungswerkzeuge für die energietechnische Gebäudesanierung.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 vorhanden

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

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

- [1] M. Zimmermann, (mark.zimmermann@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **IEA Building Annex 50 Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Buildings** (JB)
- [2] R. Hastings, (robert.hastings@freesurf.ch), AEU, Wallisellen: **IEA Task 37 Advanced Housing Renovation** (JB)
- [3] M. di Paolantonio, (m.dipaolantonio@holligerconsult.ch), Holliger Consult GmbH, Epsach: **Realisierung elektronischer Bauteilkatalog** (SB)
- [4] R. Sigg, (sigg@intep.de), Intep, Zürich: **MINERGIE-ECO – Systemnachweis für nachhaltige Hochbauten** (JB)
- [5] B. Keller, (bkeller@hbt.arch.ethz.ch), Professur für Bauphysik, ETH, Zürich: **Weiterentwicklung der Klimaflächenmethode und -software zu erhöhter Praxisverwendbarkeit**
- [6] Th. Frank, (thomas.frank@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Überarbeitung Programm HELIOS** (SB)
- [7] H. Manz, (heinrich.manz@empa.ch), Empa, Dübendorf: **Empirische Validierung von Gebäudesimulationsprogrammen (IEA/SHC Task 34)** (JB)
- [8] G. Zweifel, (gzeifel@HTA.FHZ.ch), HTA Luzern, Horw: **Validierung IDA – ICE** (SB)
- [9] C.U. Brunner, (cub@cub.ch), Büro CUB, Zürich: **Bauen, wenn das Klima wärmer wird** (JB)
- [10] M. Jordi, (Martin.Jordi@renggli-haus.ch), Renggli AG, Schötz: **Entwicklung eines VIP-Passivhausfassadenelements** (JB)
- [11] A. Binz, (a.binz@fhbb.ch), FHBB, Muttens: **Bauelemente und Systeme mit VIP für Aussenwand und Dach** (JB)
- [12] P. Rutz, (paul.rutz@toblerag.ch), Tobler AG, Urdorf: **Entwicklung eines kompakten Fussbodenheizungselements mit integrierten VIP** (JB)
- [13] B. Arnold, (bzre@zzwancor.ch), ZZ Wancor, Regensburg: **Weiterentwicklung, QS und Langzeitverhalten von Vakuumisolutionspaneelen mit mechanischem Schutz (Vacucomp P)** (JB)
- [14] O. Huth, (olaf.huth@empa.ch), Empa, Dübendorf: **Thermotragelemente aus hochfestem Faserverbundstoff und integrierten Vakuumisolutionspaneelen (VIP)** (JB)
- [15] P. Oelhafen, (peter.oelhafen@unibas.ch), Universität Basel, Basel: **Neue optische Beschichtungen für transparente Gebäudeteile im Hinblick auf einen verbesserten sommerlichen Wärmeschutz** (JB)
- [16] J.-L. Scartezzini, (jean-louis.scartezzini@epfl.ch), EPF LESO-PB, Lausanne: **High performance Integrated Lighting Systems (Green lighting)** (JB)
- [17] V. Dorer, (viktor.dorer@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Building Integrated Fuel Cell and other Cogeneration Systems (IEA/BCS Annex 42)** (JB)
- [18] B. Matthey, (info@masai-conseils.com), B. Matthey 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** (JB)
- [19] Th. Afjei, (thomas.afjei@fhbb.ch), FHBB, Muttens: **Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen** (JB)
- [20] M. Conde, (mconde.petit@mrc-eng.com), M. Conde Engineering, Zürich: **Open absorption system for cooling and air conditioning using membrane contactors** (JB)
- [21] A. Primas, (alex.primas@bhz.ch), Basler&Hofmann AG, Zürich: **Hocheffiziente Kühlsysteme für Gebäudesanierungen** (JB)
- [22] H. Manz, (heinrich.manz@empa.ch), Empa, Dübendorf: **Passive cooling by night-time ventilation using climate responsive elements** (JB)

- [23] P. Hollmüller, (Pierre.Hollmuller@cuepe.unige.ch), CUEPE Université de Genève, Genève: **Coolshift – Système de rafraîchissement par ventilation déphasée** (JB)
- [24] R. Furter, (rfurter@hta.fhz.ch), HTA, Luzern/Horw: **Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte für Komfortlüftung** (SB)
- [25] B. Frei, (bhfrei@hta.fhz.ch), HTA Luzern, Horw: **Feuchte in Niedrigenergiebauten** (JB)
- [26] B. Frei, (bhfrei@hta.fhz.ch), HTA Luzern, Horw: **Feldvergleich von Wärme- und Enthalpieübertragern in Kompaktlüftungsgeräten** (JB)
- [27] A. Huber, (huber@igjzh.com), Huber Energietechnik AG, Zürich: **Internetbasierte Einstellung von Zeitsteuerungen haustechnischer Anlagen** (JB)
- [28] M. Stalder, (m.stalder@energienetz.ch), Ingenieurbüro für Enegetechnik, Rifferswil: **Nachrüstung von Beleuchtungen mit Bedarfssteuerungen** (JB)
- [29] W. Hässig, (haessig@sustech.ch), B+H, Zürich: **Elektrizitäts- und Wärmeeinsparungen durch CO2-gesteuerte Lüftungen in Schulbauten** (JB)
- [30] G. Courret, (gilles.courret@heig-vd.ch), Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud, Yverdon: **Environmental friendly high efficient light source** (JB)
- [31] H. Hilbi, (hubert.hilbi@micro.biol.ethz.ch), ETH Institut für Mikrobiologie, Zürich: **Wachstumsregulation von Legionella pneumophila in Biofilmen und Amöben** (SB)
- [32] R. Stulz, (roland.stulz@novatlantis.ch), novatlantis, Zürich: **Projektkoordination Nachhaltige Quartierentwicklung** (JB)
- [33] P. Voyame, (pierre.voyame@fhbb.ch), FHBB, Muttens: **Nachhaltige Quartierentwicklung Basel Gundeldinger Feld – Lehrpfad Nachhaltigkeit** (SB)
- [34] D. Robinson, (darren.robinson@epfl.ch), EPF-Lausanne, **Quartiers durables BaLaLuZhRapport Lausanne-Bellevaux** (SB)
- [35] J. Inderbitzin, (jinderbi@hsw.fhz.ch), HSW Luzern, **Nachhaltige QuartierentwicklungBaLaLuZh-BaBeL** (SB)
- [36] W. Ott, (walter.ott@econcept.ch), Econcept, Zürich: **Entscheidungs- und Vorgehenscheckliste** (SB)
- [37] W. Ott, (walter.ott@econcept.ch), Econcept, Zürich: **Energieaspekte städtischer Quartiere und ländlicher Siedlungen** (JB)
- [38] P. Vuilleumier, (pierrrene.vuilleumier@planair.ch), Planair, La Sagne: **Aspects énergétiques des quartiers urbains et des agglomérations rurales dans le canton de Neuchâtel** (JB)
- [39] R. Dettli, (reto.dettli@econcept.ch), Econcept, Zürich: **Umweltwirkungen von Gebäudestandards: Perspektiven für den Gebäudepark Schweiz** (SB)
- [40] Ch. Zeyer, (christian.zeyer@ibe.ch), ibe AG, Bern: **Die Wikung von MuKE, Minergie und Minergie-P** (JB)
- [41] A. Primas, (alex.primas@bhz.ch), Basler&Hofmann AG, Zürich, **Ökologische Bewertung neuer WKK-Systeme und Systemkombinationen** (JB)

Liste der P+D-Projekte

- [42] H. Holinger, (heinrich@holinger-solar.ch), Holinger Solar AG, Liestal: **Wattwerk- erstes Plusenergie-Gewerbehaus** (JB)
- [43] P. Oesch, (p.oesch@twdmueller.ch), Gebr. Mueller AG, Bern: **P+D-Projekt mit Messungen SOLARIX- Wandheizsystem Solarix**

Referenzen

- [44] M. Erb: **Co-Chair Session on Vacuum Insulation**, 4th European Conference on Energy Performance & Indoor Climate in Buildings (EPIC), F-Lyon, 2006
- [45] H. Simmler and S. Brunner: **Thermal properties and service life of vacuum insulation panels (VIP)**, Proc. of the 4th European Conference on Energy Performance & Indoor Climate in Buildings (EPIC), F-Lyon, 2006
- [46] P. Loutzenhiser, H. Manz, P.A. Strachan, C. Felsmann, Th. Frank, G. Maxwell, P. Oelhafen, **An Empirical Validation of Modeling Solar Gains Through a Glazing Unit Using Building Energy Simulation Programs**, HVAC&R Research Volume 12 (4), (2006) 1097-1116
- [47] Conrad U. Brunner, Urs Steinemann, Martin Jakob: **Adaptation of commercial buildings to hotter summer climates in Europe**, paper Nr. 29 for IEECB'06 in Frankfurt/Germany (April 2006). Published in the conference proceedings
- [48] **14. Schweizerisches Status-Seminar 7./8. September 2006**. Das diesjährige Status-Seminars «Energie- und Umweltforschung im Bauwesen» wurde von der EMPA und brenet gemeinsam durchgeführt. 216 Personen haben an der Konferenz teilgenommen. Die 53 Sessions- und 5 Plenumsreferate gaben an den beiden Seminartagen einen Überblick über die schweizerischen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Energienutzung. Die Herren Prof. Th. Stocker von der Universität Bern und Dr. Chris Luebke, Direktionsmitglied der ARUP London haben zwei interessante Hauptreferate präsentiert. Das Schlussreferat wurde vom neuen Programmleiter Gebäude Dr. Charles Filleux gehalten.
- [49] **Internetseite des Forschungsprogramms: Mit dem Wechsel des Programmleiters erhält das Programm eine neue Internetadresse www.bfe.admin.ch/ren**, operativ ab Frühjahr 2007.

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM VERKEHR / AKKUMULATOREN

Martin Pulfer

martin.pulfer@bfe.admin.ch



Erste Tests des Coaster in Arosa

Das via einen Leitstand gesteuerte Taxi benötigt keinen Fahrer. Der Energieverbrauch beträgt ca. 2 l Benzinäquivalent pro 100 km.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Nach wie vor ist der **Verkehr in der Schweiz der grösste Energieverbraucher**. Gegenwärtig benötigt er, bei zumeist steigender Tendenz, rund einen Drittel der Endenergie in unserem Lande. Mit 48,6 % (Stand 2000, inkl. Flugverkehr) hat er auch den höchsten Anteil an den Emissionen des Treibhausgases CO₂. Der Treibstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen können durch ein **adäquates Mobilitätsverhalten** drastisch gesenkt werden. Gerade während einer Phase mit hohen Luftschadstoffbelastungen (beispielsweise im Sommer) und insbesondere in den Agglomerationen der Städte sollten möglichst viele Kurzstreckenfahrten mit dem Personenwagen (PW) umweltschonend, energie- und zeitsparend durch ein einspuriges Verkehrsmittel (Velo, *E-Bike*, *E-Scooter*, etc.) oder durch eine Fahrt mit dem öffentlichen Verkehr ersetzt werden. Auch bei PW-Fahrten mit dem Fahrstil *Eco-Drive* kann 10–15% Treibstoff eingespart werden. Hierbei sind auch Pneudruck, Luftwiderstand und Ballast gebührend zu berücksichtigen.

Durch den Kauf eines effizienten PW lassen sich, gegenüber einem ineffizienten, bei gleicher Sitzplatzzahl, gleichem Nutzvolumen und Komfort, gut 30 % Treibstoff sparen. Das **Forschungsprogramm Verkehr** untersucht Ansätze und Massnahmen zur Absenkung des Energieverbrauchs,

insbesondere beim Hauptverbraucher, dem motorisierten Individualverkehr. Erreicht werden damit auch eine Reduktion der Umweltbelastung sowie die Stärkung des Industriestandorts Schweiz. 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 insbesondere 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 2006

VERKEHR, VERHALTEN UND GRUNDLAGEN

Im Rahmen des Forschungsprojekts **Verbrauch und Emissionen Gesamtverkehr Schweiz** [1] ermittelt die EMPA Verbrauchs- und Emissionsfaktoren von einzelnen Verursachergruppen des schweizerischen Fuhrparks. Diese werden in Kombination mit den Nutzerverhalten und den Betriebsstunden zu Gesamtemissionen hochgerechnet. Dieses Vorgehen erlaubt eine präzise Beurteilung der Beiträge der einzelnen Fahrzeugklassen zum CO₂- und Schadstoffausstoss in der Schweiz. Das entsprechende Berechnungswerkzeug *Handbuch der Emissionsfaktoren* wird von allen betroffenen Bundesstellen (BFE, BAFU, ASTRA, BFS, ARE u.a.) genutzt, um die Beiträge des Verkehrs an den CO₂-Ausstoss und die Luftqualität zu bestimmen und die Wirkung von Gegenmassnahmen zu beurteilen.

In der vergangenen Projektperiode sind neben der Nachführung der Verbrauchs- und Emissionsfaktoren der neu in Verkehr gesetzten Fahrzeugklassen wesentliche Erkenntnisse über gesonderte Einflüsse auf die Emissionswerte von CO₂ und Schadstoffen wie etwa der Kaltstart bei verschiedenen Abstellzeiten erfasst worden. Zudem ist der Effekt der Umgebungstemperatur auf

das Emissionsverhalten von Fahrzeugen ermittelt worden. Der Einfluss des Betriebs von Klimaanlage und des Einsatzes von neuartigen Systemen zur Abgasnachbehandlung auf den Energieumsatz im Fahrzeug wurde durch die EMPA ebenfalls quantifiziert.

Ausserdem ist ein *Simulationsmodell* zur rechnerischen Bestimmung der Emissionsfaktoren von Personenwagen durch die EMPA entwickelt worden. Damit lassen sich der Einfluss von Widerständen (Zuladung, Steigung), Fahrverhalten (Schaltstrategie) und Verkehrsmassnahmen auf den Verbrauch und die Emissionen ohne zusätzliche Messungen bestimmen. Somit weisen die erfassten Messwerte eine vielfach höhere Aussagekraft auf.

Die ETH Zürich arbeitet im Rahmen des EWG Programms am **Autoklassen-Wechselverhalten: Mögliche Beeinflussung durch Lenkungsabgaben beim Neuwagenkauf** [2]. Bis anhin sind folgende Ergebnisse erzielt worden:

Die wohl wichtigste Konsumentenentscheidung bzgl. CO₂-Emissionen des Strassentransports ist der Neuwagenkauf. Er legt den Treibstoffver-

brauch für im Mittel 160'000 Fahrzeugkilometer unwiderruflich fest. Als Lenkungsabgabe wird derzeit ein so genanntes *Bonus-Malus-System* auf Basis der Energie-Etikette diskutiert; das Autokaufverhalten soll durch Bonusprämien für sehr energie-effiziente neue Autos beeinflusst werden.

Forschungsbereich ist speziell die Frage, ob die Wirksamkeit von *Bonus-Malus-Systemen* stark beeinträchtigt werden könnte durch unbeabsichtigte Nebeneffekte: dann nämlich, wenn Käufer geneigt wären, den zur Erlangung einer Bonuszahlung notwendigen Verzicht auf Leistung durch ein Mehr an Autogrösse zu kompensieren. Im Rahmen der heutigen *energieEtikette* entspricht dies einem Wechsel zu relativ schweren A-Klasse-Fahrzeugen. Entscheidend ist auch, in welchem Ausmass die Käufer zuerst sich losgelöst vom konkreten Marktangebot auf eine bestimmte Autoklasse (Kombi, Van, usw.) festlegen, oder ob die Käufer sich durch eine Bonuszahlung zu einem Aufstieg zu einer grösseren Autoklasse verleiten lassen.

Die heutige Definition der Effizienzklassen in der Schweiz erschwert ein effektives Bonus-Malus-System mit realen CO₂-Einsparungen: Wie Simulationen zeigen, kommt es zwar zu grösseren Marktumschichtungen bzgl. der Anteile der Effizienzklassen an den Neuzulassungen, die resultierende absolute CO₂-Einsparung ist aber vergleichsweise gering. Es scheint aber möglich, unter Beibehaltung einer relativen Bewertungszahl ein effektives *Bonus-Malus-System* zu implementieren, wenn die Definition der Bewertungszahl angepasst wird (so dass schwere Dieselfahrzeuge, namentlich SUV's, nicht für eine Bonuszahlung in Anmerkung kommen).

Es ist möglich, schwere Geländewagen von der Effizienzklasse A fernzuhalten und trotzdem das Leergewicht als Masszahl für «Autonutzen» beizubehalten. Dazu eignet sich die «Transformation» des Leergewichts mit einem Exponenten ($0.89 \leq a \leq 0.95$); zusätzlich ist eine leichte Erhöhung des so genannten Nullgewichts in betracht zu ziehen.

Taxis haben ein besonderes Potential, innovative Fahrzeugtechnologien für die Bevölkerung bekannt und erfahrbar zu machen (Fig. 1). Das von der IWB durchgeführte Projekt **HUT – Hundert Umwelttaxis für die Region Basel** [3], ist daher ein wesentlicher Beitrag zur Diffusion umweltschonender Fahrzeugtechnologien in der Region Basel, und ein möglicher Prototyp für Programme in anderen Regionen der Schweiz. In der Begleitforschung wurden daher Taxihalter, -fahrer, und -kunden zu Einstellungen, Erfahrungen und Präferenzen befragt, die für den Erfolg dieses Programms ausschlaggebend sind. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse diskutiert.

Für eine vollumfängliche Erreichung der Ziele des HUT-Projektes müssten rund 18 % der Taxihalter



Figur 1: Erdgas-/Umwelttaxis werden von Kunden teilweise bereits gezielt geordert.

bereit sein, innerhalb der nächsten Jahre Taxifahrzeuge anzuschaffen. Bereits heute wären rund 23 % der Taxihalter bereit, ein Gasfahrzeug anzuschaffen. Bei einer durchschnittlichen Einsatzzeit der Taxis von rund 6 Jahren und durchschnittlich 4 Fahrzeugen pro Taxihalter scheint das Projektziel in den nächsten drei Jahren erreichbar. Positive Erfahrungen der Erdgastaxi-Pioniere sind dabei entscheidend, um die heute noch unentschiedenen Taxihalter (rund 60 %) überzeugen zu können. Offensichtlich sind für eine Mehrzahl der Taxihalter wirtschaftliche Anreize eine Bedingung für die Anschaffung von Erdgasfahrzeugen. Vertrauen in die Technologie (Pannenanfälligkeit, Sicherheit) und Erfahrungswerte über Treibstoff- und Unterhaltskosten werden entscheidend sein für einen weitergehenden Umstellungsprozess. Eine klare Kommunikation der Erfahrungswerte scheint eine weitere sinnvolle Massnahme für die Entscheidungsunterstützung der Taxihalter zu sein. Ferner müssten neben diesen direkten finanziellen und operativen Argumenten, die komparativen Umweltvorteile der Fahrzeuge gezielt für eine stärkere Kundenbindung genutzt werden. Dies bedingt eine stärkere Umweltkommunikation und weitergehende Massnahmen. Dabei sollten nicht nur die Geschäftskunden sondern auch die Privat-Kunden einerseits im Fahrzeug selbst, aber andererseits auch schon bei der Bestellung auf Ihre Wahlmöglichkeit, ein Umwelttaxi bestellen zu können, hingewiesen werden. Schon heute können klare Norm- und Präferenzbildungseffekte zugunsten Erdgasfahrzeugen bei Taxikunden beobachtet werden. Diese sollten gezielt, mit klaren Wahlmöglichkeiten und Angeboten gefördert werden, damit diese schliesslich bei den Kunden zu einer klaren Verhaltensveränderung und zu einer Bindung an Umwelttaxis führen.

Das Projekt **Electric Two Wheeler** [4] des Büro für Verkehrsplanung ist integriert im IEA-Projekt **Hybrid and Electric Cars**. Das Projekt arbeitet direkt mit dem Promotionsprogramm **NewRide** von EnergieSchweiz zusammen. Vorerst wurden die Unterschiede Niederlande – Schweiz im **E-Bike** Markt untersucht. In der Schweiz, einem Pionierland für **E-Bikes**, werden gegenwärtig rund 4500 **E-Bikes** pro Jahr abgesetzt; in den Niederlanden

mit einer nur rund 50 % grösseren Bevölkerung werden pro Jahr mehr als 10 Mal soviele *E-Bikes* verkauft. Die Untersuchung ergab folgende Hauptgründe dafür, dass in den Niederlanden *E-Bikes* bereits heute energiepolitisch relevant sind:

- Der holländische Marktleader *Sparta*, mit seinem *E-Bike Ion*, ist mit herkömmlichen Fahrrädern bereits langjährig im Fahrradmarkt etabliert und besitzt ein entsprechendes Verkaufsnetz und den dazu gehörenden After-sale-Service. In der Schweiz verfolgt nur der Marktleader *Biketec* mit seinen *Flyer*-Produkten denselben konsequenten Weg, verfügt aber über ein wesentlich geringeres Marketingbudgets und ist im Fahrradhandel nur über die *E-Bikes* verankert;
- Die Niederlande stellen **das** Veloland dar.

Die eigentlichen Promotionsbemühungen laufen jedoch in beiden Ländern parallel: Informieren / Sensibilisieren / Interesse wecken / Erleben und Nutzen aufzeigen.

LEICHTBAU UND KLEINFahrZEUGE

An der Hochschule Rapperswil wurde das neuartige **Ultraleicht-Elektromobil Urbano** [5] entwickelt. Es handelt sich um ein vierrädriges Fahrzeug, welches zwei erwachsene Personen und zwei Kinder (oder Gepäck) befördern kann. Bei der Konstruktion wurde darauf geachtet, dass das Fahrzeug auch bei kleinsten Stückzahlen kosteneffizient gefertigt werden kann. Entscheidend dabei ist das Konzept der Verbindung des Chassis mit der Karosserie, welches speziell für dieses Fahrzeug entwickelt und ausgelegt wurde. Die Konstruktion wurde auf das Notwendigste reduziert, ohne an Funktionalität zu verlieren (was anhand von Prototypen zu beweisen ist). Ausserdem wurde darauf geachtet, dass die einzelnen Bauteile, Baugruppen und das Gesamtfahrzeug ohne aufwändige Fertigungswerkzeuge hergestellt werden können. Um die Fahreigenschaften abzuklären wurde ein vereinfachter Prototyp aufgebaut, welcher anfangs 2007 getestet werden soll.

Das Hauptziel des Projektes **Lightweight Vision 0 - 21 (Livio 21)** [6] von *Horlacher, Rieter Automotive, Winterthur Versicherung*, den Fachhochschulen beider Basel und der Fachhochschule Aargau ist die Entwicklung neuer Technologien (Konstruktionen, Materialien, Prozesse) zur Herstellung von leichtgewichtigen Modulen für die Automobilindustrie. Mit solchen Modulen kann die Schweizer Zuliefererindustrie massgeblich zur Reduktion des Fahrzeuggewichtes und damit zur Verringerung des Treibstoffverbrauchs der Autos beitragen.

Zur Erprobung und Demonstration dieser neuen Technologien wird das *Konzeptfahrzeug Livio 21*

markenneutral als «fahrende Plattform» aufgebaut. Die Hauptstruktur des Fahrzeugs besteht aus einem metallischen Rahmen und leichten Composite-Modulen mit integrierten Funktionen. Ein solches Fahrzeug wird als leichtgewichtiger Kleinwagen (wenig Querschnitt) mit guter Aerodynamik und einem effizienten Antriebssystem mit einem Minimum an Energie fahren können.

Im Themenkreis Fussgänger-Sicherheit ist ein neuartiger Fussgänger-Airbag verbunden mit einem System zur Fixation der Fussgängerbeine erprobt worden (Fig. 2). Damit soll der Aufprall des Fussgängers gedämpft und insbesondere vermieden werden, dass der Fussgänger durch den Crash wegkatapultiert wird und sich beim Sekundäraufprall auf der Strasse schwer verletzt.



Figur 2: Erprobung des Crash mit einem Fussgänger: der Frontairbag mildert dessen Aufprall, die Fixation der Unterschenkel verhindern dessen Wegschleudern und damit dessen gefährlichen Zweitcrash (auf den Boden).

Der **E-Bike-Reichweitentest** [7] von *Schneider Kommunikation*, verfolgt drei Hauptziele: Entwicklung des Modells, Verbreiterung der Datenbasis, Entwicklung einem standardisierteren Test für neue *E-Bikes*. 2006 wurden im Rahmen eines Pilotversuchs verschiedene Parameter getestet (Fig. 3), auf deren Grundlage Tests für die Entwicklung des Modells durchgeführt werden konnten. Mit dem Modell kann für jedes *E-Bike* einerseits die Netto-Leistung, andererseits die Reichweite in Abhängigkeit der bei der Fahrt eingesetzten Humanenergie und Leistung berechnet werden. Die Daten, die 2007 zu erhärten sind, zeigen, dass die meisten *E-Bikes* – insbesondere die die mit Velovignette zugelassenen sind – im Bereich bis 150 Watt menschlicher Leistung eine substantielle Netto-Leistung erbringen. Selbst bis 200 Watt menschlicher Leistung bieten alle getesteten Fahrzeuge eine darüber hinaus gehende Netounterstützung. Für Leistungssportlerinnen und -sportler stehen mit dem *Swizzbee* und dem *Flyer S*, der 2007 auf den Markt kommt, zwei Modelle zur Auswahl, die selbst bei 250 Watt Humanenergie eine nennenswerte Netto-Unterstützung bie-

ten. Neben der Eigenleistung der FahrerIn bzw. des Fahrers ist die Steuerung des *E-Bikes* von entscheidender Bedeutung.

Die meisten Modelle leisten die grösste Unterstützung bei tiefen Kadenzen. Dies bedeutet, dass gerade dann, wenn die menschliche Kraft schwindet und dabei typischerweise die Tretkadenz sinkt, die Unterstützungsleistung des *E-Bikes* zunimmt. Ausnahmen sind auch hier *Swizzbee* und *Flyer S*, die selbst bei hohen Kadenzen – typisch für routinierte Rennradfahrer – eine deutlich spürbare Unterstützung gewähren. Veloseitig ist die Reichweite abhängig von der Kapazität der Batterie und der Leistung des Motors.



Figur 3: *E-Bikes als urbane Nah- bis Mittelstreckenfahrzeuge (d.h. ca. < 15 km) im Test.*

EFFIZIENTE ANTRIEBE

An der ETH Zürich werden **kraftstoffeffiziente Antriebssysteme** [8] entwickelt. Im Teilprojekt *Optimale Regelung thermischer Systeme* lag der Schwerpunkt auf der Herleitung einer Methodik zur Entwicklung von optimalen, modellbasierten, prädiktiven Feedback-Regelungen, welche das Verhalten eines Systems optimieren und für die Echtzeit-Anwendung geeignet sind. An zwei Beispielen wurden die Resultate angewendet. Einerseits wurde das Warmlaufverhalten eines Personenwagens durch eine bedarfsgerechte Regelung von Zuheizsystemen optimiert. Andererseits wurde das Energiemanagement eines hybriden Brennstoffzellensystems für eine Verkürzung der Warmlaufphase betrachtet. Die Untersuchung wurden in einer Dissertation *Optimal control of thermal systems: Engineering applications* zusammengefasst [21].

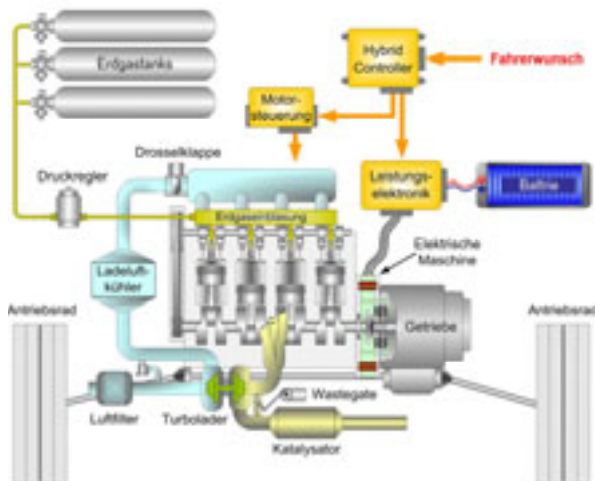
In einem zweiten Teilprojekt wurde die *Modellbildung und Regelung für ein mit einem Druckwellenlader aufgeladenes Motorsystem* untersucht und entwickelt: Druckwellenlader können an Stelle von Turboladern bei Benzinmotoren eingesetzt werden um die Teillastproblematik zu entschärfen. Im Gegensatz zu ATLS weisen diese Systeme ein

weniger gravierendes «Turboloch» auf, sie sind jedoch anfällig auf ungewollte Abgasrezirkulation. Um diese zu verhindern braucht es ausgeklügelte Regelungen. Ziel dieser Arbeit war es, Modelle und auf diesen basierende Regelstrukturen zu entwerfen und zu parametrieren, um den Druckwellenlader optimiert betreiben zu können. Es wurde ein regelungstechnisch orientiertes Mittelwertmodell abgeleitet. Basierend auf diesem wurde dann ein Regelkonzept entworfen und experimentell an einem Motorenprüfstand verifiziert. Der Regler vermag die während Lastsprüngen auftretende AGR-Effekte zu verhindern, und der Lader wird wirkungsgrad-optimal betrieben. Die Untersuchungen wurden in der Dissertation *Modeling and control of pressure-wave supercharged engine systems* zusammengefasst [22].

Im Teilprojekt *Optimierte Strategien für parallele Hybridfahrzeuge* werden modellbasierte Strategien entwickelt und untersucht, die den Kraftstoffverbrauch von parallelen Hybridfahrzeugen minimieren. Dabei muss die Strategie die Momentanaufteilung zwischen Verbrennungs- und Elektromotor finden, um die geforderte Fahrleistung zu erfüllen und dabei den Treibstoffverbrauch zu minimieren. Zusätzlich muss die Strategie garantieren, dass der Ladestand der Batterie am Ende des Fahrzyklus erhalten bleibt, das heisst, keine elektrische Energie dem Fahrzeug extern zugeführt werden muss. Es konnte gezeigt werden, dass eine, in Zusammenarbeit mit *Robert Bosch GmbH* entwickelte, kausale Strategie bezüglich Treibstoffverbrauch sehr nahe beim Optimum ist, solange die Ladestandsgrenzen der Batterie nicht erreicht werden. Der Kern der kausalen Strategie ist ein Äquivalenzfaktor, welcher elektrische Energie gegen Treibstoffenergie gewichtet. Dieser Faktor ist abhängig vom Fahrzyklus und vom Fahrzeug und muss so gefunden werden, dass der Ladestand der Batterie erhalten bleibt. Über das mittels dynamischer Programmierung gefundene globale Optimum kann der optimale Äquivalenzfaktor für jeden Zeitpunkt und Ladestand ermittelt werden. Dies erlaubt einfache Zusammenhänge zwischen dem Äquivalenzfaktor und dem Ladestand abzuleiten.

Methan-Motoren haben auf mehreren Gebieten eine technologische Aufholjagd vor sich, wenn sie ihre ökologischen und ökonomischen Vorteile auch in Zukunft beibehalten und einen wichtigen Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten sollen. Das **CLEVER** (CLEan and Efficient VEHICLE Research) [9] Projekt der Empa und ETH Zürich setzt sich zum Ziel, die Grundlagen für diese technische Aufholjagd zu schaffen und die Potenziale in einem Prototypenfahrzeug zu demonstrieren (Fig. 4). Als Industriepartner beteiligen sich die *Volkswagen AG* und die *Robert Bosch GmbH* am Projekt. Die Industriepartner entwickeln und liefern Prototypenbauteile und ermöglichen den Zugriff auf

spezifische F+E-Werkzeuge. Das Projekt hat drei Hauptstossrichtungen: F+E von Brennverfahren für homogene Methandirekteinblasung bei aufgeladenen Motoren, F+E zur Realisierung von dauerhaltbaren methanangepassten Dreiwege-Katalysatoren, F+E zur Hybridisierung von turboaufgeladenen Methanmotoren. Das Projekt wurde im August 2006 gestartet. Im Moment werden durch zwei Doktoranden die numerischen und experimentellen Werkzeuge in Betrieb genommen. Der Versuchsmotor ist aufgebaut, erste Experimente sind im Februar 2007 geplant.



Figur 4: Geplanter Aufbau des Antriebsstrangs für das Projekt CLEVER.

In **HyCarPRO** [10] wird durch **ESORO** ein optimiertes Brennstoffzellen-System entwickelt und im Alltag erprobt. Als Basis dient das von **ESORO** eigenfinanzierte Konzeptfahrzeug **HyCar**, ein plug-in-fähiger Technologieträger mit der Schweizer **ZEBRA**-Batterie. Eckwerte des optimierten Systems sind eine Effizienz im Teillastbereich von über 50 % und daraus resultierende Reichweiten von 250 km auf Autobahnen und 400 km im Pendelbetrieb, sowie ein Verbrauch ab Tank von weniger als 30 kWh / 100 km (entspricht ca. 3 l Benzin / 100 km). Hauptziele des Projektes sind eine Optimierung des Systems und eine transparente Erprobung des Fahrzeugs im Alltag. Die Optimierung umfasst dabei neben Leistung und Effizienz auch die Robustheit und Kosten. Als Nebeneffekt kann und soll das Fahrzeug auch zur Information und Demonstration der Technologie verwendet werden.

Bei der Beschaffung konnten – mit Ausnahme von wenigen Teilen in der Verrohrung des Systems – ausschliesslich Standard-Komponenten verwendet werden. Dies führt zu geringeren Systemkosten und zu einer erhöhten Robustheit des Systems. Hinsichtlich der Robustheit wurde das Steuerungs- und Überwachungssystem überarbeitet und anhand von Simulationen getestet.

Messungen der einzelnen Komponenten wie z.B. der Abnahmetest der Brennstoffzelle zeigen, dass die Leistungs- und Effizienzziele erreicht werden können. Evaluierte Komponenten wurden beschafft und zusammen mit den Brennstoffzellen in den **HyCar** eingebaut. Das Fahrzeug konnte anlässlich von **Zürich Multimobil** der Öffentlichkeit präsentiert werden.

FAHRZEUGE

REVA ist ein Leichtelektromobil, das seit Juni 2001 in Bangalore, Indien, für den globalen Markt produziert wird (Fig. 5). Mehr als 1900 **REVAs** sind gebaut worden und werden hauptsächlich in Indischen Städten aber auch in 12 anderen Ländern erfolgreich gefahren. Dieses Fahrzeug, günstig hergestellt (aktueller Preis in Indien, je nach Ausrüstung: 10'000 bis 13'000 CHF), ist ein ideales, emissionsfreies, energieeffizientes Stadtfahrzeug, muss aber an schweizerische/europäische Marktanforderungen angepasst werden. **Paso** entwickelt den **REVA EURO** [11] so weiter, dass er folgende Anforderungen erfüllt:

- Spitzengeschwindigkeit 85 km/h (im Vergleich zu 65 km/h des aktuellen REVA);
- Reichweite 100 bis 150 km (im Vergleich zu 60 bis 80 km des aktuellen REVA);
- Beschleunigung 0 auf 50 km/h in weniger als 10 Sekunden;
- Wartungsfreier Antriebsstrang und Batterie.

Das Fahrzeug soll anlässlich des internationalen Automobilsalons in Genf im Frühjahr 2007 ausgestellt werden. Es verbraucht umgerechnet auf Benzin 1 l / 100 km.



Figur 5: Der REVA Euro zum Nachweis der EMV-Verträglichkeit auf dem Rollenprüfstand.

Im Projekt **COASTER** [12] entwickelt die Firma **Brusa** das Antriebssystem für ein schienengebundenes, führerloses Taxi. Eine erste Pilotanlage ist am Bürserberg im Eingang des Brandnertals

(Österreich) in der intensiven Erprobung. Das Gesamtsystem soll künftig in sensiblen Gebieten die Strasse, bzw. den PW ersetzen. Erste kleinere kommerzielle Anlagen sind für mehrere touristische Gebiete in Vorbereitung; eine steht in Arosa kurz vor der Inbetriebnahme.

Die Carrosserie *Hess* entwickelt einen Seriehybrid-Bus **lighTram3 Hybrid** [13]. Das Fahrzeug soll einen Primärenergieverbrauch unterhalb eines reinen Dieselmotors erreichen. Mittels Energiemanagement und optimalem Speicherkonzept wird die elektrische Bremsenergie zwischengespeichert und beim nächsten Beschleunigungsvorgang dem Antrieb zur Verfügung gestellt. Dieses führt dazu, dass der Dieselmotor nicht auf die Spitzenleistung des Fahrzeuges ausgelegt werden muss, sondern reduziert um die aus dem Speicher zur Verfügung gestellte Leistung. Die Speicher sind so dimensioniert, dass eine bestimmte Strecke mit diesem Fahrzeug in einem reinen «zero-emission» Betrieb befahren werden kann.

AKKUMULATOREN / ULTRAKAPAZITÄTEN

Nachdem 2003 an der sicheren und zuverlässigen Performance des **TOHYCO-Rider Kleinbusses** [14] mit Superkapazitäten gearbeitet wurde, standen 2004 vor allem die Vorbereitungsarbeiten und die Durchführung des Pilotbetriebes zwischen dem Bahnhofplatz Luzern und dem Verkehrshaus im Mittelpunkt (Fig. 6). Der Pilotbetrieb zeigte auf, dass das Grundkonzept des Antriebs mit nur Superkapazitäten (SCAPs) und der IPT Ladung sehr zufriedenstellend arbeitet und ein effizienter Betrieb möglich ist. Der Energiebedarf lag unter dem Standardwert von 0.1 kWh pro Kilometer und pro Tonne. Dieses Ergebnis konnte dank der guten Rekuperation, die durch die SCAPs ermöglicht wird, erzielt werden.

Es gab aber keine grösseren Pannen, welche das Grundsystem in Frage gestellt hätten. Von Mai bis Oktober 2006 war der **TOHYCO-Rider** Teil der «Top oder Flop»-Sonderausstellung im Verkehrshaus der Schweiz. Im Rahmen dieser Ausstellung konnten die Museumsbesucher an vier Tagen pro Woche eine Fahrt im TR-Bus mitmachen. Während dieses Betriebs lief die ganze Zeit das eigens entwickelte Diagnose- und Datenaufzeichnungsgerät, mit dessen Auswertungen umfangreiche Energiebetrachtungen angestellt wurden. Daraus ging hervor, dass der Bus dank der Rekuperation mit SCAPs im Mittel 25 % Energieeinsparungen ermöglicht. Bei sehr hartem «Stop&Go»-Betrieb

liegt der Prozentanteil sogar bedeutend höher. Im Anschluss an den erfolgreichen Abschluss der beiden Pilotbetriebsversuche Einsätze 2004 und 2006 wird nun aktuell an der weiteren Industrialisierung und Vermarktung des Konzeptes gearbeitet.

Das Paul Scherrer Institut, Villigen, erforscht in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Buchs den **Micro Super Capacitor** [15]. Im Berichtszeitraum konnte ein grundlegendes Verständnis des Zusammenhangs zwischen Kapazität und elektronischer Leitfähigkeit von hydratisiertem RuO₂ entwickelt werden. Die Doppelschicht-Kapazität ist optimal wenn sowohl die elektronische als auch die ionische Leitfähigkeit gross sind. Da beiden Grössen durch die Temperaturbehandlung gegenläufig beeinflusst werden, liegt der Bereich optimaler Eigenschaften des RuO₂ in einem mittleren Temperaturbereich. Das Verhalten des Niedertemperatur Materials bei niedrigen Potentialen wird trotz guter Protonenleitfähigkeit durch die elektronische Leitfähigkeit bestimmt. Andererseits ist die Kapazität des Hochtemperaturmaterials wegen der geringen ionischen Leitfähigkeit suboptimal. Diese Ergebnisse basieren wesentlich auf *in situ*-Leitfähigkeitsmessungen. Die Ergebnisse zu den Materialeigenschaften von RuO₂ wurden in zwei wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht [23]. Im Bereich der Mikrostrukturierung ist es gelungen, die aufgetretenen Probleme bei der Ätzung und bei der Metallisierung der kammartigen Strukturen teilweise zu lösen. Die Metallbeschichtung konnte von Nickel auf Platin umgestellt werden. Es stehen jetzt Mikrostrukturen mit der notwendigen Pt Beschichtung zur Verfügung. Diese Strukturen werden in der verbleibenden Projektzeit getestet werden.

Die Forschung an Batterien und an Superkondensatoren am Paul Scherrer Institut Villigen verfolgt zwei strategischen Ausrichtungen: Die eine umfasst die Materialseite und die zweite die Diagnose der Speicher. Auf der Materialseite wurden neue Elektrodenmaterialien, insbesondere für Lithium Akkumulatoren, synthetisiert, weiterverarbeitet und erprobt. Auf der Diagnoseseite wurden die Speicher mit modernen analytischen Methoden untersucht. Zum Einsatz kommen spektroskopische, mikroskopische Methoden und sogar die *Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS*. Dieser Teilchenbeschleuniger dient hier gleichzeitig als ein gigantischer Röntgenapparat und als ein riesiges Mikroskop [16].

Internationale Zusammenarbeit

Im Projekt **Hybrid and Electric Vehicles** [17] der Internationale Energie-Agentur (IEA) arbeiten 9 Länder zusammen. In diesen Ländern verkehrt die

Hälfte aller Autos, die weltweit zugelassen sind. Gegenwärtig sind in diesen Ländern folgende Anzahl alternativer Fahrzeuge in Betrieb:

Year	2002		2003		2004		2005	
Vehicle Type	EV ¹	HEV	EV ¹	HEV	EV ¹	HEV	EV ¹	HEV
Austria	597	0	533	0	515	0	1'300	75
Belgium	n/a ²	0	n/a	0	n/a	0	n/a	441
Finland	450	2	450	2	460	102	460	102
France	10'171	0	10'706	144	11'013	650	n/a	n/a
Italy ³	55'262	210	95'162	247	112'481	220	n/a	n/a
Netherlands	100	1'000	500	1'000	500	2'000	500	3'000
Sweden	500	530	471	624	422	1'355	n/a	n/a
Switzerland	3'500	350	10'686	472	12'201	1'021	~12'000	1'933
U.S.A.	33'047	65'615	45'656	113'140	55'852	196'293	68'000	385'000
Total	103'627	67'707	164'164	115'629	193'444	201'641	82'260	390'551
China ⁴	2'200'000	--	6'400'000	--	13'000'000	--	23'000'000	--
Denmark	360	0	360	0	300	15	650	35
Japan	4'700	74'600	5'600	91'200	n/a	120'000	n/a	150'000
Taiwan	40'000	--	55'000	--	75'000	--	94'000	--
GRAND TOTAL	2'348'687	142'307	6'625'124	206'829	13'268'744	321'656	23'176'910	540'586
¹ Includes e-bikes and e-scooters ² n/a = not available ³ The 2004 EV count for Italy includes HEV cars; separate data are not available. The HEV count of 200 includes only buses. ⁴ Estimate								

Tabelle 1: Verbreitung der Hybrid- und der Elektrofahrzeugen in den in den Partnerländer des Implementing Agreement HEV der IEA.

Im Projekt sind gegenwärtig 7 Teilprojekte aktiv. Diese beschäftigen sich mit folgenden Themen: Informationsaustausch, Hybride Fahrzeuge, Saubere Stadtfahrzeuge, Elektrochemische Systeme, Elektrozweiräder, Hybride Transportfahrzeuge, und Brennstoffzellen für Fahrzeuge.

Weitere Information befinden sich unter <http://www.ieahev.org>.

Im IEA Projekt **Advanced Motor Fuels** (AMF) [18] wirkt die Schweiz, vertreten durch die Fachhochschule Bern / Biel, seit 2004 aktiv mit. Die

weiteren 10 Mitgliedsstaaten sind Dänemark, Finnland, Frankreich, Italien, Japan, Kanada, Spanien, Schweden, UK und USA.

Zur Zeit sind folgende Teilprojekte aktiv: Informationsaustausch, Städtischer Gütertransport, Fischer-Tropsch Synthese / Treibstoffe, Partikel Emissionen von Motorrädern, und Analyse von Biodiesel.

Detaillierte Informationen befinden sich unter <http://www.iea-amtf.vtt.fi>.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

2006 wurden keine massgebenden Projekte abgeschlossen. Hingegen konnten einige wissenschaftlich interessante Vorhaben mit einem hohen Energiesparpotential gestartet werden. Bemerkenswert sind auf der Seite der Umsetzung die über 100 Bestellungen des 2005 abgeschlossenen Entwicklungsprojekts für den *Swisstrolley3* und der jährliche Umsatzzuwachs bei den *E-Bikes* von ca. 40 %. Das Leuchtturmprojekt *PAC-Car II* verzeichnete auch 2006 global eine sehr hohe Beachtung und wurde u.a. von *CNN* länger präsentiert. Aufsehen erregend war auch der Bau der ersten kommerziellen *Coaster*-Anlage in Arosa

die im Frühsommer 2007 den Betrieb aufnehmen wird. Gespannt sind wir hier auf deren Funktion, auf die Lärmemissionen und insbesondere auf die Kundenakzeptanz.

Für das Jahr 2007 ist der Abschluss von *Livio 21*, von *REVA Euro* und von *Urbano*, alles Projekte im Themenkreis Leichtbau, vorgesehen. Die erst vor kurzem gestarteten Antriebsprojekte der ETH und EMPA werden gegebenenfalls erste Erkenntnisse liefern; die Projekte sind jedoch längerfristig angelegt und werden erst 2009 / 2010 ihre wirklichen Potentiale aufzeigen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 vorhanden

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

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

- [1] M. Weilenmann, (martin.weilenmann@empa.ch), EMPA, Dübendorf **Verbrauch und Emissionen Gesamtverkehr Schweiz** (JB) <http://www.empa.ch>.
- [2] P. de Haan, (dehaan@env.ethz.ch), ETH-Zürich: **Autoklassen – Wechselverhalten** (JB), <http://www.ethz.ch>.
- [3] S. Ulli (silvia.ulli@psi.ch) St. Lienin, (stephan.lienin@sustainerv.com), sustainsurv, **Zürich HUT – Hundert Umwelttaxi für die Region Basel** (SB), <http://www.novatlantis.ch>.
- [4] U. Schwegler, (ursschwegler@bluewin.ch), e'mobile, Fischen: **Electric Two Wheeler** (JB), <http://www.e-mobile.ch>.
- [5] M. Henne, (markus.henne@hsr.ch), Hochschule Rapperswil, Rapperswil: **Ultraleicht-Elektromobil Urbano**: (JB), <http://www.iwk.hsr.ch>.
- [6] M. Horlacher, (thomas.efler@bluewin.ch), Horlacher Möhlin: **Livio21**, (JB), <http://www.horlacher.com>.
- [7] B. Schneider (info@schneidercom.ch), Schneider Communications, Ottenbach: **E-Bike-Reichweitentest** (JB), <http://www.schneidercom.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] P. Schweizer (pschweizer@pasol.ch), Pasol, Titterten: **REVA EURO** (JB); <http://www.pasol.ch>.
- [12] P. Matt, (philipp.matt@brusa.biz), Brusa, Sennwald: **COASTER** (JB), <http://www.brusa.biz>.
- [13] H.-J. Gisler, (hans-joerg.gisler@hess-ag.ch), Carrosserie Hess, Bellach: **lighTram3 Hybrid** (JB), <http://www.hess-ag.ch>.
- [14] V. Härrli, (vvhaerri@hta.fhz.ch), HTA-Luzern, Horw: **TOHYCO-Rider Kleinbus** (JB); <http://www.hta.fhz.ch>.
- [15] R. Kötz (ruediger.koetz@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Villigen: **Integrated micro-supercapacitors** (JB), <http://www.psi.ch>.
- [16] Paul Scherrer Institut, Villigen: Electrochemistry Laboratory: **Annual Report 2006**, <http://ecl.web.psi.ch>.
- [17] S. Kleindienst Muntwyler (muntwyler@solarcenter.ch) Solarcenter Muntwyler, Zollikofen: **IEA Implementing Agreement HEV** (JB), <http://www.ieahev.org>.
- [18] J. Czerwinski, (jan.czerwinski@hti.bfh.ch) HTI Bern, Biel: **IEA Implementing Agreement AMF** (JB,) <http://www.iea-amf.vtt.fi>.

Referenzen

- [19] M. Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch) BFE, Bern: **Programme Verkehr und Akkumulatoren / Supercaps 2004 – 2007**, <http://www.bfe.admin.ch/themen/00507/00509/>.
- [20] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007**, download unter: <http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/>.
- [21] E. Müller (eric.mueller@alumni.ethz.ch), ETH-Zürich: **Optimal control of thermal systems**, download unter <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/cgi-bin/show.pl?type=diss&nr=16889>.
- [22] P. Spring (peter.spring@alumni.ethz.ch), ETH-Zürich: **Modeling and control of pressure-wave supercharged engine systems**, download unter: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/cgi-bin/show.pl?type=diss&nr=16490>.
- [23] O. Barbieri, M. Hahn, A. Foelske, R. Kötz (ruediger.koetz@psi.ch) PSI, Villigen: **Effect of electronic resistance and water content on the performance of RuO₂ for supercapacitors**, J. Electrochem. Soc. 153 (11), A2049-A2054 (2006).

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN

Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM ELEKTRIZITÄT

Roland Brüniger

roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch



Isotherme Druckluftspeicherung

Gemäss theoretischen Berechnungen könnte mit der Druckluftspeicherung ein Gesamtwirkungsgrad von gegen 70% erreicht werden. Im Projekt *Machbarkeit des Druckluftspeicher-Konzepts BOP-B* wurden Funktionsmuster entwickelt. Links der Motor/Generator und rechts der neuartige Wärmetauscher. (Quelle: Brückmann Elektronik).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Mit über 20% Anteil am schweizerischen Gesamtenergieverbrauch spielt die Elektrizität in allen Bereichen des täglichen Lebens eine unverzichtbare Rolle. Das Programm **Elektrizität** unterstützt in erfolgversprechenden Bereichen einen effizienten Einsatz der elektrischen Energie. Das Forschungsprogramm gliedert sich dabei in die beiden Hauptbereiche **Technologien** und **Effiziente Anwendungen**. In beiden Bereichen besteht das Ziel darin, Grundlagen für einen sorgfältigen und effizienten Umgang mit der Elektrizität zu schaffen und mit nachgelagerten Umsetzungsaktivitäten sicherzustellen, dass das erarbeitete Wissen in die Praxis umgesetzt wird.

Im Bereich **Technologien** bestand die Zielsetzung im Jahr 2006 darin, neben der eigentlichen Materialforschung die Entwicklungen in den *thermoelektrischen Materialwissenschaften* sowohl im Hoch- als auch im Niedertemperaturbereich auf deren Anwendbarkeit zur direkten *Energiekonversion Wärme-Elektrizität* vertieft zu prüfen. Ebenfalls war die Initiierung von Projekten zur Abklärung energetischer Nutzungsmöglichkeiten des *magnetokalorischen Effekts* ein Ziel. 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 es, dass eine minimale Kontinuität im Projekt- und Informationsbereich sichergestellt wird. Dies umfasst einerseits die Teilnahme am entsprechenden *IEA-Implementing-Agreement* und andererseits eine kontinuierliche Interaktion mit der

Industrie. Ferner galt es, die Untersuchungen zur technologischen Machbarkeit bezüglich *Druckluftspeichertechnologie* unter Einbezug von privaten Forschern fortzusetzen.

Der Bereich **Effiziente Anwendungen** ist in mehrere Teilbereiche gegliedert. Das Themengebiet der *Informations- und Kommunikationstechnik* ist dynamisch und durch einen globalen Massenmarkt geprägt. Ein Schwerpunkt 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. Insbesondere die internationalen Aktivitäten zur Effizienzverbesserung in den Bereichen *Settop-Boxen* und *Breitbandgeräte* waren im 2006 national einzubringen. Eine weitere Zielsetzung lag darin, bei den Vorbereitungen eines EU-Projekts zum Thema *Server-Effizienz* mitzuarbeiten und anschliessend als Projektpartner daran teilzunehmen. Der Hauptfokus im Bereich *elektrische Antriebe* bestand im Aufarbeiten von fach- und markttechnischen Grundlagen für den geplanten Wissenstransfer durch *Energie-Schweiz*. Daneben galt es unverändert, technische Grundlagen zur Effizienzsteigerung von Motoren und Antriebssystemen zu entwickeln. Im *Gerätebereich* bestand die Zielsetzung für 2006 darin, bei ausgewählten Geräten die Grundlage für eine Effizienzsteigerung zu erarbeiten. Die Effizienz von unterschiedlichsten Geräten wie Wasserdispensern, Wäschetrockner, Minikühlschrank und USV-Anlagen stand dabei im Vordergrund.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

EFFIZIENTE TECHNOLOGIEN

HOCHTEMPERATUR-SUPRALEITUNG (HTSL)

Mit der Teilnahme am *Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector* [1] der Internationalen Energie Agentur (IEA) wird der Zugang zu umfassenden, internationalen Informationen über die weltweiten Aktivitäten auf dem Gebiet der HTSL gewährleistet. Zu den möglichen Anwendungen zählen supraleitende Kabel, Transformatoren, Strombegrenzer (siehe Figur 1), Generatoren, Motoren, Schwungradlager sowie magnetische Energiespeicher (SMES). Vertieft wurden 2006 neben den rotierenden Maschinen die supraleitenden Fusionsmagnete, was im Zusammenhang mit dem internationalen Beschluss steht, den Testreaktor ITER in Frankreich zu bauen. Weiter standen die Supraleitern

der sog. «zweiten Generation» (Coated Conductors) im Vordergrund: Bereits wurden 480 m mit Stromdichten von 200 A hergestellt. Der Rekordwert von 720 A entspricht einer Verdreifachung gegenüber den Werten von 2005 und weist auf ein grosses Entwicklungspotential hin. Die umfangreichen Informationen dieser internationalen IEA-Treffen wurden an alle in der Schweiz in der Supraleitung tätigen Forschungsinstitute und Industrien im Rahmen des alljährlich stattfindenden HTSL-Seminars vermittelt.

Im Projekt *Elektrische Maschinen, insbesondere Generatoren: Supraleiter-Technologie im Wettbewerb mit verbesserter, konventioneller Technologie* [2] wurden mögliche effizienzsteigernde Massnahmen für einen konventionellen Generator aufgelistet und unter Miteinbezug der Risiken mit dem HTSL-Generator untersucht. Das Projekt führte zur Erkenntnis, dass die erwar-

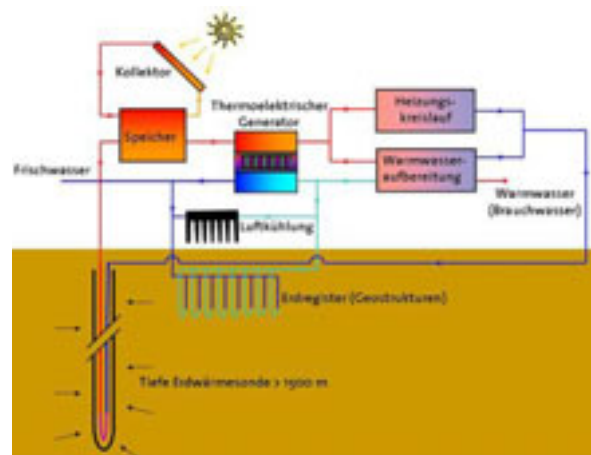


Figur 1: Ein 10 MVA-HTSL-Strombegrenzer (Siemens).

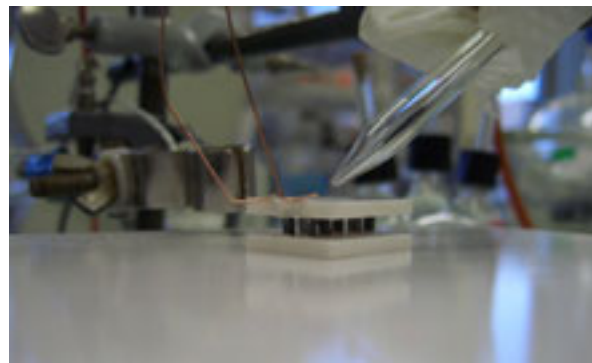
teten, besseren Eigenschaften der Supraleiter der zweiten Generation zwingend erforderlich sind, um einen Durchbruch zu erzielen. Der Preis beim HTSL der zweiten Generation muss für wirtschaftlich interessante Anwendungen unter 20 Euro/kA sinken. Falls diese Entwicklung sich bewahrheitet, dürfte ein wirtschaftlicher und effizienter Bau eines HTSL-Generators möglich werden. Die Verbesserungsideen bei einem konventionellen 700MVA-Generator (niedrigere Kühltemperaturen, Verminderung der Luftspaltreibungs- und Erregerverluste) führten leider nicht zu den gewünschten Effizienzverbesserungen, weshalb auf eine Weiterführung verzichtet werden muss.

ENERGIE-KONVERSION

Die Aktivitäten im Bereich der Thermoelektrizität – der direkten Wandlung von Wärme in Elektrizität – haben weltweit stark zugenommen. Mit dem Projekt **Thermoelektrisches Kraftwerk** [3a] wird die Machbarkeit eines thermoelektrischen Kraftwerks mittels theoretischen Betrachtungen, Simulationen und punktuellen experimentellen Abklärungen untersucht. Nebst einem numerischen Generatormodell wurden 2006 analytische Methoden entwickelt, die eine einfache Dimensionierung und Funktionsabschätzung eines Thermoelektrischen Generators (TEG) erlauben. Parallel dazu wurde ein auf finiten Elementen basierendes Modell eines Thermoelementes konstruiert, das die Temperaturabhängigkeiten der Materialeigenschaften sowie die 3-dimensionale Verteilung von Temperatur, elektrischem Strom und Potential einbezieht. Im Niedertemperaturbereich stehen mit den heute verfügbaren Materialien Abwärmennutzungen (z.B. im Gebäude) und Wärme-Kraft-Kopplungen als potentielle Anwendungen im Vordergrund (siehe Figur 2). Um den zur Diskussion stehenden Temperaturbereich von etwa 400K auszudehnen, werden im ergänzenden Projekt **Anwendungspotential der thermoelektrischen Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich** [3b] analog dem vorerwähnten Projekt Anwendungen im Bereich von 1200K untersucht.



Figur 2: Schema einer thermoelektrischen Energiekonversion im Gebäude (ETH Zürich).



Figur 3: Messungen an einer thermoelektrischen Materialprobe (EMPA).

Parallel und eng mit den vorerwähnten Projekten verzahnt werden Anstrengungen zur Verbesserung der thermoelektrischen Materialien mit dem Projekt **Geo-Thermopower (Geo-TEP) Material** [4a] im Niedertemperaturbereich (siehe Figur 3) und mit dem Projekt **Materialentwicklung für solarthermische Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich** [4b] unternommen. In beiden Projekten konnten wesentliche Materialerkenntnisse und einhergehend Fortschritte in Richtung Effizienzverbesserung erzielt werden.

Die magnetokalorische Heiz- und Kältetechnik – von Emil Warburg 1881 mit der magnetischen Kühlung erstmals entdeckt – hat weltweites Aufsehen erregt, als 1996 der «Giant Magnetocaloric Effect» entdeckt wurde. Dieser Effekt eröffnete die Perspektive, einen technologisch völlig neuartigen Kühlschrank zu konstruieren. Basierend auf dieser Ausgangslage soll die Studie **Anwendung der magnetischen Kältetechnik und ihre Bewertung** [5a] generell untersuchen, welche Gebiete der Kältetechnik – von der kleinströmigen Kühlung elektronischer Komponenten bis

hin zur grossen Kälteproduktion in der Prozessindustrie – sich für die Anwendung der magnetischen Kältetechnik eignen. Da der Effekt auch umgekehrt auftritt, wird im ergänzenden Projekt **Anwendungen der magnetischen «Power Production» und ihre Bewertung** [5b] der inverse magnetokalorische Effekt oder die temperaturabhängige Magnetisierung von Magneten untersucht, um Niedertemperaturwärme (zwischen 50 °C und 300 °C) in mechanische oder elektrische Energie umzuwandeln.

SPEICHERUNG

Eine effiziente Energiespeicherung ist für mobile Anwendungen (z.B. Auto) und für die stochastische Stromerzeugung durch erneuerbare Energien erforderlich. Mit dem Projekt **Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzepts BOP** [6a] wird ein erfolgversprechendes Druckluftspeicherkonzept überprüft. Dabei stehen die beiden grundsätzlichen Komponenten Wärmetauscher und Motor/Generator im Vordergrund. Denn das BOP-Prinzip (BOP = Batterien mit Oelhydraulik und Pneumatik) kann nur dann effizient arbeiten, wenn die Kompression und Expansion der Luft weitgehend isotherm erfolgen. Deshalb sind in den Arbeitsräumen Wärmetauscher zu integrieren, welche in Verbindung mit Flüssigkolben den erforderlichen Wärmetransport gewährleisten. Die Versuche haben gezeigt, dass die gewählten Wärmetauscher thermisch den Anforderungen genügen. Es haben sich aber im Umfeld des Flüssigkolbens einige unerwartete Effekte ergeben, welche eine Weiterentwicklung der Versuchsanordnung erfordern. Im Ergänzungsprojekt **Druckluftspeicherung: Optimierung / Ausmessung bestehende Projektmuster** [6b] werden diese Effekte näher untersucht. Ebenfalls wurde ein effizienter Motor/Generator mit möglichst über 90% Wirkungsgrad (inkl. Elektronik) für eine 24V/1500W-Anlage entwickelt. Der gewählte Ansatz einer eisenlosen Maschine brachte leider nicht den gewünschten Erfolg. Die Eliminierung der Eisenverluste wurde durch andere Verluste leider wieder aufgehoben. Dennoch konnten wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden.

EFFIZIENTE ANWENDUNGEN

INFORMATIONEN- UND KOMMUNIKATIONSTECHNIK

Der Anteil der Informationstechnik am Stromverbrauch in der Schweiz liegt bei etwa 10%. Weltweit ist man sich vermehrt dem durch die rasante Verbreitung von Informations- und Kommunikationsgeräten bedingten Stromwachstum bewusst. Das **Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik** [7] strebt an, die für die Schweiz relevanten Informationen zu erkennen und national bekannt zu machen. Die durch das Kompetenzzentrum betriebene Website www.biblioite.ethz.ch

leistet dazu einen wertvollen Beitrag. Ergänzend werden umsetzungsorientierte Forschungsthemen analysiert und Forschungsprojekte evaluiert, konzipiert und teilweise selbst durchgeführt.

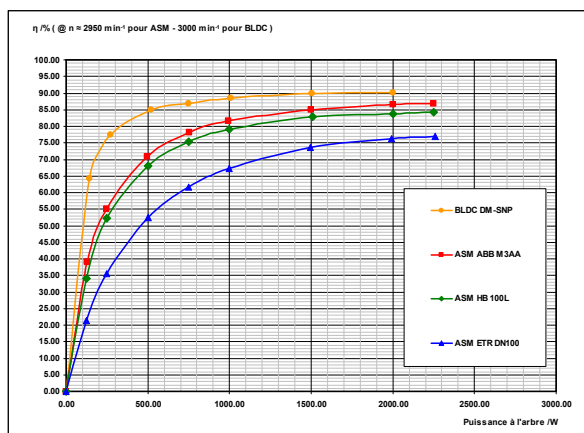
Intelligente Gebäude liegen durch neue Kommunikationstechniken im Trend und können bei geschicktem Einsatz einen wesentlichen Beitrag zur Energieeffizienz leisten. Um den Strommehrverbrauch durch die dazu erforderliche Installation von Informatik-Komponenten in Grenzen gehalten zu halten, wurden im Projekt **Home Automation System** [8] Sensoren, Aktoren und Steuergerät für eine energieeffiziente, adaptive Steuerung im Haushaltsbereich entwickelt. Mit diesen wurde anschliessend ein intelligentes, adaptives Automationssystem für Beleuchtung, Beschattung, Heizung und Lüftung in Wohn- und Büroräumen aufgebaut und in zwei Wohnungen installiert. Die Verbrauchswerte der Komponenten sind im Vergleich zu herkömmlichen Systemen extrem gering und die Messungen zeigen, dass dank des Einsatzes dieses Systems in den zwei Wohnungen etwa 25 % des thermischen Energiebedarfs und 30 bis 60% des Energiebedarfs für Beleuchtung gespart werden kann.

Häufig trifft man fest installierte Video- und Datenprojektoren in Sitzungszimmern und privaten Wohnzimmern an. Mit dem Projekt **Energieeffizienzpotenzial von fest installierten Beamern** [9a] wurde erhoben, dass aufgrund der Leistungsaufnahme im Bereitschaftsmodus von 6 bis 17 Watt rund 40% der totalen Energieaufnahme in diesem «nicht aktiven» Zustand benötigt wird. Der Gerätebestand in der Schweiz wird auf ca. 170'000 Geräte geschätzt, wobei bis zum Jahr 2010 noch eine beträchtliche Zunahme auf über 400'000 Geräte erwartet wird. Zu den Nutzungszeiten sind wenig verlässliche Informationen vorhanden, weshalb drei Szenarien betrachtet wurden. Je nach Nutzungszeit ergibt die Hochrechnung einen Strombezug auf Landesstufe für das Jahr 2006 zwischen 13 und 25 Gigawattstunden. Ohne wesentliche Effizienzsteigerung wird der Verbrauch bis ins Jahr 2010 auf 44 bis 99 Gigawattstunden ansteigen. Als primäre Massnahme ist vorgesehen, unter Einbezug von europaweiten Aktivitäten, die Energieaufnahme im Bereitschaftsmodus substantiell zu verringern. Aufgrund dieser Arbeiten hat der Bund die installierten Beamer mit dem Energiespargerät Ecoman ausgerüstet.

MOTOREN / ELEKTRISCHE ANTRIEBE

Mit dem Projekt **Wirtschaftlichkeit, Anwendung und Grenzen von effizienten Permanentmagnetmotoren** [10a] wurde unter Mitwirkung von 2 Fachhochschulen eine Gegenüberstellung des Permanentmagnet-Motors zur Asynchronmaschine vorgenommen, um die energetischen Vorteile

und die Grenzen von effizienten Permanentmagnet-Motoren (PMM) zu bestimmen (siehe Figur 4). Für die Herstellung von Permanentmagnet-Motoren zeigen sich bis in den Leistungsbereich von einigen 100kW keine Grenzen. Hier nähern sich auch die Wirkungsgrade der beiden Motorenarten einander an. Die PMM lassen sich bei Leistungen unter 10kW, wo die hohen Stückzahlen am Markt liegen, mit höherem Wirkungsgrad und geringerem Gewicht bauen, als vergleichbare Asynchronmotoren. Die Minderkosten für das eingesparte Kupfer und Aluminium werden durch Aufwendungen für das Magnetmaterial in etwa ausgeglichen, wenn vom schwereren IEC Normmotor (Asynchronmotor) zum leichteren Permanentmagnet-Motor gewechselt wird. Die bevorzugte Anwendung von PMM sind Strömungsmaschinen, die sich durch einem Bedarf für Drehzahlverstellung und durch lange Laufzeiten charakterisieren.



Figur 4: Wirkungsgrad-Verlauf eines Permanentmagnet-Motors (Typ: BLDC-DM-SNP) im Vergleich zu drei Asynchronmotoren unterschiedlicher Effizienzklassen (Circle Motor AG).

Aufgrund der Erkenntnisse des vorangehenden Projekts wurde eine **Erweiterung der LCC-Applikation mit Permanentmagnet-Motoren** [11a] gestartet. Damit sollen bei der Lebenszyklus-Betrachtung (LLC) auch die PMM miteinbezogen werden.

Im Projekt **Funktionsmuster eines Integral-Sparmotors im Leistungsbereich < 1 kW** [10b] wurde ein Funktionsmuster entwickelt und mit Wirkungsgradmessungen die Effizienz nachgewiesen. Eine nun anstehende Kommerzialisierung wird voraussichtlich nächstens mit Industriepartnern angegangen. Auch im höheren Bereich sind PMM sehr effiziente Antriebe. Aus diesem Grund werden im Projekt **Effizienter Permanentmagnet-Motor im Bereich 3 kW** [10c] die bisherigen Ergebnisse mit einem «Scale-Up-Prozess» für einen höheren Leistungsbereich angepasst.

Mit dem EU-Projekt **Promot: Ein Werkzeug zur Entscheidungsfindung für Motorenbetreiber**

[12a] wurde ein Werkzeug, welches die Nutzung des Energiesparpotentials bei elektrischen Antrieben unterstützt, erstellt und im EU-Raum bekannt gemacht. Dazu wurde einerseits das von der Washington State University auf der Basis von Motor Master entwickelte Software-Paket IMSSA (*International Motor Selection and Saving Analysis*) angepasst und als europäisches EURODEM-Tool entwickelt. Ferner wurde ein Pumpen- und VSD-Modul erarbeitet. Andererseits wurden die vorhandenen Dokumente und Tools in einer Web-Site und in einer Broschüre zusammengefasst und einer breiten Öffentlichkeit (mehrsprachig) bekannt gemacht.

Die ca. 150'000 Aufzugsanlagen in der Schweiz verbrauchen jährlich rund 300 GWh Strom. Die Zielsetzung im Projekt **Energieeffiziente Lifte im Wohnbereich** [13] besteht in einer Verbesserung der Energieeffizienz von Aufzügen und Förderanlagen durch Entwicklung eines neuartigen Frequenzumformers. Als geeignete Massnahme werden das Bremsen mit Netzurückspeisung anstelle von Bremswiderständen sowie eine Reduktion der Standby-Verluste durch komplettes «Stromlosmachen» des Umrichters angepeilt. Nach der erfolgreichen technischen Auslegung ist für 2007 beabsichtigt, einen ersten Prototypen zu bauen und auszumessen.

Im Projekt **Energiesparmöglichkeiten mit intelligenten Stern-Dreieck-Schaltern** [14] wurden die Energiesparmöglichkeiten und die Wirtschaftlichkeit von lastabhängigen Stern-Dreieck-Schaltern untersucht. Intelligente Stern-Dreieck-Schalter schalten einen Asynchronmotor bei geringer Last automatisch in die Sternschaltung und bei hoher Last wieder in die Dreieckschaltung. Dadurch kann die Leistungsaufnahme im Teillastbereich zwischen 20% und 65% reduziert werden. Bei Anwendungen mit einer Teillastzeit von 1000 Stunden pro Jahr ergeben sich Stromkosteneinsparungen von wenigen Franken pro Jahr und kW Nennleistung. Für den einzelnen Anwender und hochgerechnet auf die möglichen Anwendungen in der Schweiz ein zu kleiner Effekt, um weiterverfolgt zu werden.

Schrittmotoren sind beliebte Antriebselemente. Sie sind einfach anzusteuern, brauchen im Allgemeinen kein Motorfeedbacksystem und sind daher robust und zuverlässig. Schrittmotorenanwendungen findet man im Leistungsbereich bis etwa 300 W. Im Projekt **Massnahmen zur Ausschöpfung des Energiesparpotenzials bei Schrittmotorenansteuerungen** [15a] wurde nach dem Bau eines Funktionsmusters mit Messungen nachgewiesen, dass mit einem neuartigen, optimalen Ansteuerungsverfahren der Energieverbrauch um gegen 80% reduziert werden kann.

Der Fortschritt der Technik und neue Antriebskonzepte wie der Linearmotor oder Torquemotoren in

Kombination mit moderner Halbleiterelektronik sowie hocheffiziente mechanische Getriebe lassen es zu, hydraulische und pneumatische Antriebe in vielen Anwendungsfällen wirtschaftlich zu ersetzen. Im Projekt **Ersatz von pneumatischen und hydraulischen Antrieben: Potentialstudie** [15b] wurde theoretisch nachgewiesen, dass der Energiebedarf mit einem Ersatz bis zu 90% reduziert werden kann. Anhand der bestehenden Anlagen in Industriebetrieben wurde eine Potentialabschätzung durchgeführt. Die Hochrechnung für die Schweiz ergibt im Fall der Substitution der pneumatischen Anlagen eine jährliche Einsparung von etwa 770 GWh und im Bereich der hydraulischen Anlagen beträgt diese etwa 135 GWh. Als nächstes soll anhand konkreter Beispiele die Einsparung praxisgerecht nachgewiesen werden.

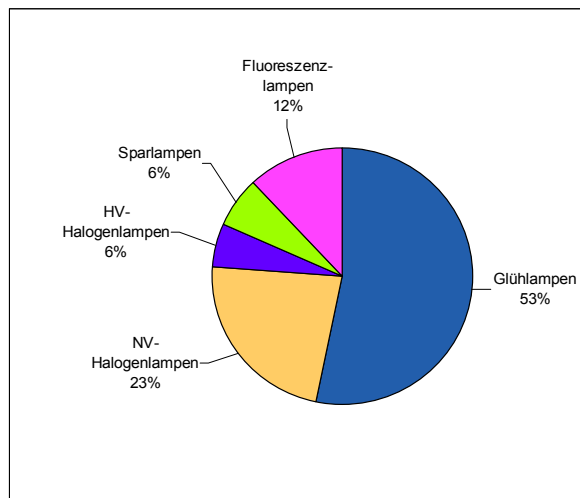
Das Projekt **Energieeinsparungen bei Ersatz von Getriebemotoren durch FU-Antriebe** [12b] befasst sich mit dem Energiesparpotential, welches durch den Ersatz von Antriebslösungen mit Getriebe durch solche mit Direktantrieb und/oder Frequenzumrichter zu realisieren ist. Der Anteil von Getriebemotoren wird auf ca. 10% geschätzt. Falls man sich auf Schneckengetriebe-Antriebe konzentriert sowie auf Drehzahl- und Drehmomentbereiche, für die vom Marktvolumen her vergleichbare Direktantriebe schon heute angeboten werden, wird das schweizerische Einsparpotential auf jährlich etwa 81 GWh geschätzt.

LICHT / LEUCHTEN

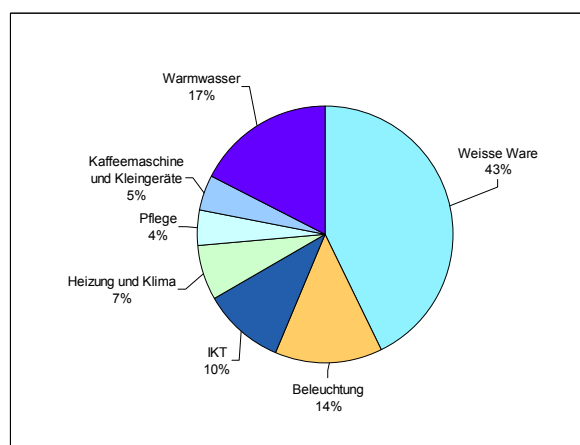
T5-Lampenadapter werden im Markt als Möglichkeit zum Stromeinsparen im Lichtbereich angesprochen, obwohl es dazu verschiedene Studien mit teilweise widersprüchlichen Resultaten gibt. Ziel des Projekts **Qualität und Wirtschaftlichkeit von T5-Lampenadaptern** [16] ist es, unter Berücksichtigung von lichttechnischen Aspekten eine Aussage aus neutraler Sicht bezüglich der Qualität und Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von T5-Lampenadaptern zu machen.

Im Jahr 1992 wurde im Rahmen des Impulsprogramms RAVEL eine Studie zur Bestimmung des Haushaltstromverbrauches in der Schweiz durchgeführt, welche im 2005 durch den Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE) mit weitgehend identischer Fragestellung wiederholt wurde. Ein Vergleich der beiden Arbeiten ergibt für den Bereich der Beleuchtung in Privathaushalten eine Verbrauchszunahme von rund 80%. Die Beleuchtung ist im Jahr 2005 für 14% des Haushaltstrombezuges (siehe Figur 5 und 6) verantwortlich (ohne Elektroheizungen). Beide Arbeiten gehen von geschätzten Werten für die Nutzungszeit der Lampen aus. Wissenschaftlich abgestützte Angaben zur Nutzungszeit sind nicht bekannt. Das Projekt **Verbrauchsabschätzung**

von Lampen in Privathaushalten [9b] hat das primäre Ziel, einen Lösungsansatz für die fundierte Bestimmung der Nutzungszeiten zu finden.



Figur 5: Prozentualer Anteil (Stückzahl) verschiedener Lampen gemäss VSE-Studie (Encontrol GmbH).



Figur 6: Aufteilung des Haushaltstrombezugs gemäss VSE-Studie (Encontrol GmbH).

HAUSHALTSGERÄTE

Ziel des Projekts **Energiesparender, wäscheschonender Trockner** [17] ist die Machbarkeitsprüfung eines neuen Wäschetrockners, der energieeffizient ist (Klasse A), die Wäsche schonend trocknet und nicht teurer als marktübliche Trockner wird. Dies soll mit einem Vakuumtrockner mit Wärmerückgewinnung erreicht werden. Die thermodynamische Analyse hat gezeigt, dass mit dem vorgeschlagenen Konzept die Effizienz der heute leistungsfähigsten Trockner erreicht werden kann. Erste Kostenberechnungen sind ebenfalls ermutigend. Als nächstes ist deshalb vorgesehen, aufgrund der positiven theoretischen Ergebnisse ein Funktionsmuster zu bauen.

Die Kühlung der meisten Minibarkühlschränke in Hotelzimmern basieren auf dem geräuschlosen Absorptionsprinzip. Dieses Prinzip weist jedoch mit einer Kälte-Leistungsziffer < 0.3 eine sehr schlechte Energiebilanz aus. Gemäss einer BFE-Studie sind 50'000 bis 60'000 Absorptions-Minibars in der Schweiz im Einsatz und verbrauchen jährlich rund 24 GWh. Für die zwei Kühlprinzipien (Absorption und Kompression) wird im kürzlich gestarteten Projekt **Energiesparender Minikühlschrank** [18] eine technische Machbarkeit durchgeführt. Dazu werden neben Effizienzbetrachtungen die notwendigen Entwicklungskosten und erreichbaren Herstellkosten abgeschätzt und eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt.

Der Schweizerische Wirtschaftsverband der Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik (SWICO) veröffentlicht periodisch eine Analyse des Stromverbrauchs für die Geräte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT). Die Veröffentlichungen basieren auf Hochrechnungen aus Verkaufszahlen und spezifischen Verbrauchswerten pro Gerät. Das Ziel der Studie **Elektrizitätsverbrauchsstatistik für elektrische Geräte in Haushalten** [9c] ist es, die Datengrundlage für die Hochrechnungen mit neusten Erkenntnissen aus verwandten Studien zu ergänzen. Speziell stehen zwei Studien des *Fraunhofer*

Instituts Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI) und eine Studie des *Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE)* im Vordergrund. Im Berichtsjahr wurde eine Fraunhofer-Studie analysiert, ausgewertet und mit den Resultaten der VSE-Studie verglichen.

Diverse Geräte im Haushalt verbrauchen im ungenutzten Betriebszustand Strom. Um diesen Verbrauch zu bestimmen, wurden im Messprojekt **Standby-Verbrauch im Haushalt** [19] insgesamt 461 Messungen in 37 Wohnungen, aufgeteilt in 6 Wohnungskategorien, ausgemessen. Die nachfolgende Figur 7 zeigt die durchschnittlichen Standby-Leistungen auf.

DIVERSES

Die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) weisen den grössten Elektrizitätsbedarf als Einzelunternehmen auf. Verantwortlich dafür ist in erster Linie der Bahnenergieverbrauch, der im kürzlich gestarteten Projekt **Potentialermittlung energieeffiziente Traktion bei den SBB** [20] systematisch analysiert wird. Durch technische Verbesserungen an einzelnen Fahrzeugtypen oder betriebliche Massnahmen können selbst bei prozentual kleinen Einsparungen gesamthaft nennenswerte Energieeinsparungen erzielt werden.

Wohntyp	Anzahl Personen im Haushalt	Durchschnittliche Anzahl Geräte	Durchschnittliche Leistung (Standby)
Wohnung	1	7 – 8	18.6 Watt
Wohnung	2	11	49.4 Watt
Wohnung	3	12 – 13	37.0 Watt
Wohnung	4	17 – 18	78.4 Watt
Einfamilienhaus	1 – 2	12	45.8 Watt
Einfamilienhaus	3 und mehr	12	55.2 Watt

Figur 7: Durchschnittliche Standby-Verluste in den 6 verschiedenen Haushaltstypen.

Nationale Zusammenarbeit

Die Vertreter der etablierten **BFE-Trendwatching-Gruppen** in den Bereichen *Informatik + Kommunikation*, *elektrische Antriebe* und *Hochtemperatursupraleitung* aus Industrie, Hochschule und Forschungsstätten treffen sich periodisch. Damit steht eine nationale Informations- und Diskussionsplattform für Fachleute zur Verfügung, welche sich bewährt hat und anerkannt ist. Nachdem die europäische USV-Vereinbarung (*Code*

of Conduct) verfügbar ist, ist ferner vorgesehen, die vor ca. zwei Jahren etablierte *Arbeitsgruppe Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)* zu reaktivieren. Damit soll einerseits die nationale Umsetzung des CoC angeschoben und andererseits sollen die Grundlagen für ein Labeling von Klein-USV-Anlagen angegangen werden. Die *Arbeitsgruppe Wasserdispenser*, in der gemeinsam mit den vier namhaften Branchenleadern

die Grundlagen und der Inhalt für eine freiwillige Branchen-Vereinbarung erarbeitet wurden, konnte mit der Unterzeichnung der Branchenvereinbarung im April 2006 aufgelöst werden.

Das Projekt *Materials with Novel Electronic Properties (MANEP)* des **Schweizerischen Nationalfonds** umfasst jetzt insgesamt 19 nationale Institute sowie 5 Industrien und beschäftigt sich theoretisch oder experimentell mit HTSL-Supraleitern.

Mit dem **BFE-Forschungsprogramm Gebäude** ist eine enge Zusammenarbeit sichergestellt. Insbesondere im Bereich *Intelligentes Gebäude* sowie im spezifischen Projekt *Environmental friendly high efficient light Source* erfolgt eine gute Kooperation.

Die Zusammenarbeit mit der **Industrie** konnte in verschiedenen Bereichen (z.B. Aufzugsindustrie, Motorenindustrie, Settop-Boxen, ADSL-Modem, Detailhandel) weitergeführt werden. Es wird bei neuen Projekten soweit möglich darauf geachtet, dass ein Industriepartner im Projekt eingeschlossen ist. Damit soll von Anfang an angestrebt werden, dass bei einem Projekterfolg die anschließende Umsetzung auch angegangen wird.

Generell wird ein enger Kontakt mit dem Programm **EnergieSchweiz** [32] gepflegt, was wesentlich zur Umsetzung des generierten Wissens beiträgt. Im Bereich der Druckluft ist der Wissenstransfer praktisch abgeschlossen und die nationale Druckluft-Kampagne, in der acht einschlägige Industrien miteingebunden sind, wird vollständig durch *EnergieSchweiz* durchgeführt.

Beide Eidg. Technischen **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 Lichtbereich Projektarbeiten geleistet. Ferner bestehen Kontakte zur Fachhochschule Zürich–Winterthur. Das etablierte **Kompetenzzentrum Energie- und Informationstechnik** 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*, der westschweizer *Recherche-Développement-Formation (RDF)* und der KTI gepflegt werden. Zudem sind Kontakte mit *Swiss Electric Research* [33] der schweizerischen Stromverbundunternehmen hergestellt worden.

In mehreren Projekten wird ein enger Kontakt zu den schweizerischen **Energieagenturen EnAW, eae und S.A.F.E** [34] gepflegt. In diversen Projekten sind - soweit zweckmässig - **Branchenverbände** wie z.B. *swissT.net*, *SWISSMEM*, *SWICO* eingebunden. So wurden die Arbeiten *Energieeffizienz bei fest installierten Beamern* in enger Zusammenarbeit mit dem Branchenverband *SWICO* und der *Energie Agentur Elektrogeräte (eae)* durchgeführt.

Internationale Zusammenarbeit

Internationale Kontakte werden nach wie vor sowohl in direkter Zusammenarbeit in internationalen Projekten als auch durch Teilnahme an internationalen Konferenzen und Workshops gepflegt.

Eine internationale Zusammenarbeit ist im **Supraleitungs-Bereich** im Rahmen des **6. EU-Rahmenprogramms** etabliert (Projekt STRP-505724-1 HIPERMAG), bei der bis im 2007 MgB₂-Bänder und -Drähte mit dem Ziel erforscht werden, 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. Das Programm des **Superconducting European Network, SCENET II** (GTC1-2001-43047) mit Schweizer Beteiligung, welches mehr als 80 verschiedene europäische Gruppen aus Hochschulen und Industrie umfasste, hat leider Mitte 2006 geendet. Schliesslich sei erwähnt, dass die Uni-

versität Genf aufgrund ihrer weltweit einmaligen Messapparaturen ein **HTSL-Messprogramm** durchführen kann, in dem Leiter aus den USA, Japan und Deutschland ausgemessen und charakterisiert werden.

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 [35] sind sogenannte **Code of Conducts (CoC)** 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 alle Grundlagen im Projekt **Weiterentwicklung des Code of Conduct für USV-Anlagen mit europäischen Gremien** [26b] erarbeitet. Aufgrund der

Kompetenz wurde die Schweiz bei den Verhandlungen mit der Industrie über Zielwerte beigezogen. Es ist sehr erfreulich, dass dieser USV-CoC nun per Januar 2007 durch die EU akzeptiert wurde und zum Unterzeichnen für alle USV-Hersteller zur Verfügung steht. Nun ist vorgesehen, für Anlagen im Leistungsbereich > 10 kVA die Grundlagen für ein Label zu schaffen. Entsprechende Kontakte mit der EU (Label-Kommission) konnten geschaffen werden. Auch die weiteren, schweizerischen Arbeiten im Gebiet der **Informations- und Kommunikationstechnik** sind international abgestützt und koordiniert. So wird die Schweiz definitiv - im Rahmen des EU-Programms *Intelligent Energy Europe* - am Projekt **Development of the market for energy efficient Servers** teilnehmen. Ferner laufen Vorbereitungsarbeiten auf EU-Ebene bezüglich der **gewerblichen Kühlung**, bei denen die Schweiz aktiv mitarbeitet.

Persönliche Kontakte zu verschiedenen **Energieagenturen** (Dänemark, Deutschland, Österreich, etc.) sowie zu Schlüsselpersonen von internationalen Programmen wie z.B. das **UK Market Transformation Programme** verhelfen immer wieder zu inspirierenden Anregungen. Ferner werden unter anderem Kontakte mit der

Europäischen Kommission, der **IEA (International Energy Agency)**, der **EPA (Environmental Protection Agency)** und dem **LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)** in den USA sowie mit der französischen **ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)** gepflegt.

Durch die Arbeiten im europäischen **Motor Challenge Programm** werden ebenfalls die internationalen Beziehungen gepflegt. Zudem war die Schweiz aktiver Partner im europäischen SAVE-Projekt **Promot: Ein Werkzeug zur Entscheidungsfindung von Motorenbetreibern**.

Zeitgleich mit dem Start des SBB-Projekts begann auch das EU-Projekt **Railenergy**. Die Zielsetzung des EU-Projekts ist ähnlich wie diejenige des SBB-Projekts, aber längerfristig und viel breiter gesteckt. Die SBB und der vom BFE für das SBB-Projekt Beauftragte sind in diesen EU-Aktivitäten beteiligt.

Auch mit der Schweizer Teilnahme am internationalen **Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy sectors using Hydrogen** wird der Anschluss an die internationale Forschergemeinde unterstützt.

Pilot- und Demonstrationsprojekte / Umsetzungsaktivitäten

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten sind mit geeigneten Massnahmen möglichst effizient umzusetzen. Dazu sind oftmals Forschungsarbeiten erforderlich, die marktnah sind und Resultate in den Marktbereich überführen. Die folgenden Arbeiten haben diese Zielsetzung.

INFORMATION/KOMMUNIKATION

In der Schweiz dürften über 100'000 Server in KMU-Betrieben in Betrieb sein. Heisse Sommer und immer höhere Ansprüche an die Leistungsfähigkeit der IT-Infrastruktur führen dazu, dass vermehrt Probleme mit Überhitzung der Server-Räume auftreten. Ohne sachkundige Beratung werden viele dieser Räume mit Klimageräten ausgerüstet, obwohl über weite Teile des Jahres eine freie Kühlung genügen würde. Mit dem Projekt **Merkblatt für eine effiziente Kühlung von KMU-Servern** [21a] ist ein Merkblatt erarbeitet worden, das Geschäftsführern und IT-Verantwortlichen in KMU-Betrieben hilft, eine energieeffiziente Kühlung des Server-Raumes zu realisieren. Anhand der Demonstrationsanlage **Kühlung von EDV-Räumen in KMU-Betrieben** [21b] wurden die Merkblatt-Aussagen verifiziert.

Durch intensive Arbeit und unter Einbezug der einschlägigen Branche konnte der europäische CoC für **Settop-Boxen** in einer nationalen Vereinbarung umgesetzt werden und diese wurde

bis Ende 2006 von acht schweizerischen Unternehmungen unterzeichnet. Weitere dürften folgen. Diese Vorgehensweise hat internationales Interesse geweckt, da die europäischen Ländervertreter erkannt haben, dass eine nachhaltige, nationale Umsetzung von EU-CoC schwierig zu bewerkstelligen ist. Die Schweiz hat hier Pionierarbeit geleistet. Für 2007 ist beabsichtigt, eine analoge nationale Vereinbarung für den CoC von **Broadband Devices** auszuarbeiten und zu unterzeichnen.

MOTOREN/ELEKTRISCHE ANTRIEBE

Durch den Einsatz von energieeffizienter Antriebstechnik können Einsparungen in der Grössenordnung von 10 bis 20% des motorischen Stromverbrauchs erreicht werden. Es ist deshalb sehr wichtig, bereits während der Ausbildung angehenden Berufsleuten, Technikern und Ingenieuren das Bewusstsein für diese Thematik zu fördern. Mit dem Projekt **Energieeffiziente elektrische Antriebe in der Ausbildung** [22] wird dies mit der Fachhochschule Nordwestschweiz angegangen. Das Projekt umfasst das Zusammentragen von vorhandenem Fachwissen zu Energieeffizienz von Antrieben für die Ausbildung, Abklärungen, was von diesem Fachwissen in der schweizerischen Bildungslandschaft in welchem Rahmen bereits vermittelt wird und schliesslich das Ausarbeiten eines Grobkonzepts für Aus-

bildungsmodule. Es ist erfreulich, dass bei der telefonischen Abklärung mit weiteren Fachhochschulen, Technikerschulen und Berufsverbänden grosses Interesse bekundet wurde.

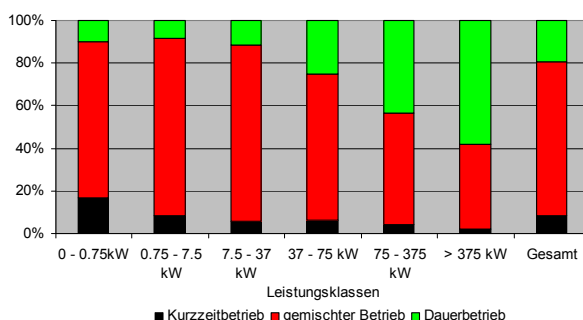
Die abschliessende Standortbestimmung bezüglich einem **Aufbau des Druckluft-Kompetenzzenters an der HTA Luzern** [23] hat leider gezeigt, dass eine derartige, neutrale Anlaufstelle an der HTA Luzern nicht im geforderten Sinn etabliert werden kann. Die Idee wurde deshalb definitiv fallen gelassen. Damit die in *EnergieSchweiz* eingebetteten **Kampagne Druckluft Schweiz** erfolgreich lanciert werden konnte, mussten verschiedene Instrumente entwickelt werden. Mit dem Projekt **Druckluft Schweiz, Beitrag an Instrumentenentwicklung für die Kampagne 2005 – 2008** [24] konnten diese termingerecht der Kampagne zur Verfügung gestellt werden.

Die EU hat im Rahmen von SAVE das *Motor Challenge Programm* gestartet. Die Schweiz nimmt daran als *assoziierter Partner* teil, was bedeutet, dass entsprechende Informationen ausgetauscht werden und Koordinationen anlässlich von Sitzungen erfolgen. Diese Aktivitäten laufen im Rahmen des Projekts **Promotion und Koordination des EU - Motor Challenge Programme (DEXA-MCP)** [25 und 36]. In verschiedenen Veranstaltungen wird das Thema der Antriebs-Effizienz präsentiert und gleichermassen werden auf der etablierten Homepage verschiedene Informationen publiziert. Ferner wird periodisch ein Newsletter versendet.

In der zweiten Etappe von *EnergieSchweiz* sind Aktionen für die Umsetzung von Wissen im Bereich Antriebe vorgesehen. Als Vorbereitung und Unterstützung dienen die Ergebnisse der beiden Projekte **Technische Grundlagen effizienter Antriebssysteme** [26a] und **Massnahmen zum Stromsparen bei Elektromotoren: Marktanalyse** [27]. Das erste Projekt hat strukturiert die Informationen über technisch effiziente Antriebssysteme zusammengetragen und daraus konkrete Aktionen definiert und das zweite Projekt definiert die anzusprechenden Zielgruppen. Zudem wurde bei der Marktanalyse auch das verfügbare Wissen der Betreiber über ihren Motorenpark erhoben (siehe Figur 8). Um die erarbeiteten Motoren-Aktionen national tragfähig zu machen, wurde Ende September 2006 ein Workshop beim BFE durchgeführt, an dem Ergebnisse dieser beiden Arbeiten und insbesondere die vorgeschlagenen Aktionen präsentiert und diskutiert wurden.

DIVERSE GERÄTE

Nachdem die Branchenvereinbarung über Wasserspender zwischen vier Anbietern in der Schweiz und dem BFE im April 2006 unterzeichnet werden konnte, war man sich einig, ergänzend zu prüfen, ob diese Vereinbarung um Wasserspender



Figur 8: Verteilung der Betriebszustände in Abhängigkeit von der Leistungsklasse. Die Anteile beziehen sich gesamthaft auf rund 16'000 Motoren, für die entsprechende Informationen aus der Industriebefragung zur Verfügung stehen (basic).

mit Leitungsanschluss erweitert werden sollte. Im Projekt **Erweiterung der Branchenvereinbarung Wasserdispenser** [21c] wurden die entsprechenden Analysen durchgeführt. Aufgrund der Tatsache, dass das zukünftige, geschätzte Einsparpotential mit 0.38 GWh relativ bescheiden ist und zudem neue Sicherheits- und Hygieneanforderungen in Vorbereitung sind, deren Einfluss auf den Energieverbrauch im Moment nicht abgeschätzt werden kann, wurden die Arbeiten in der Arbeitsgruppe sistiert. Die Branche ist aber durch diese Arbeiten sensibilisiert und wird darauf achten, dass neue Hygieneanforderungen nicht zu einem hohen Mehrverbrauch führen.

Im Projekt **Weiterentwicklung des Code of Conduct für USV-Anlagen mit europäischen Gremien** [26b] wurde die definitive Version des europäischen CoC für USV erarbeitet, mit der europäischen USV-Branche abgestimmt und der EU zur Publikation zur Verfügung gestellt. Im 2007 werden voraussichtlich die europäischen Unternehmungen den CoC unterzeichnen. Um weitere Grundlagen für ein Label für kleine USV-Anlagen zur Verfügung zu haben, wurde das Projekt **Energiemessungen von einphasigen USV-Anlagen** gestartet [28].

DIVERSES

Ab Oktober 2006 darf Klärschlamm nicht mehr landwirtschaftlich verwertet werden, sondern muss umweltverträglich verbrannt werden. Als Vorstufen zur thermischen Entsorgung stehen die mechanische Entwässerung sowie die Trocknung des Klärschlammes im Vordergrund. Im Projekt **Energetische Optimierung der Klärschlamm-aufbereitung** [29] werden die verschiedenen Verfahren der Klärschlamm-aufbereitung aus energetischer Sicht untersucht. Die verschiedenen Trocknungsverfahren wurden energetisch miteinander verglichen und in drei Kläranlagen erfolgten Messungen. Abschliessend wurden Empfehlungen betreffend Energieoptimierung

für Kläranlagenbetreiber und Fachingenieure für die Planung einer Klärschlamm-trocknungsanlage erarbeitet. Ebenfalls wurden die Erkenntnisse an *EnergieSchweiz* vermittelt, damit durch diesen Kommunikationskanal das Wissen in die Praxis getragen wird.

Die biologische Reinigungsstufe ist der grösste Stromverbraucher von kommunalen Kläranlagen. Mit dem **Messprogramm energetisch optimierter Belebungsverfahren auf ARA** [30] werden die häufigsten Klärverfahren energetisch ausgemessen. Dabei wurde am Beispiel der ARA Lyss (Festbettverfahren), der ARA Wohlen (Wirbelbettverfahren) und der ARA Wädenswil (Membran-Belebtschlamm-verfahren) der Stromverbrauch von drei zukünftig vermehrt eingesetzten biologischen Reinigungsverfahren untersucht und in Bezug zur Belastung gebracht. Um eine biologische Reinigungsstufe bezüglich Stromverbrauch optimiert betreiben zu können, müssen die Anlagen derart konzipiert sein, dass sie während Zeiten schwacher Belastung automatisch partiell

oder intermittierend betrieben werden können. Bei zunehmender Anwendung dieser neuen biologischen Reinigungsverfahren wird der Stromverbrauch ansteigen. Dies muss nicht sein, denn Kläranlagen weisen bezüglich Stromverbrauch ein erhebliches Einsparpotential auf. Das Ausschöpfen dieses Potenzials setzt aber voraus, dass dem Stromverbrauch derselbe Stellenwert zukommt wie dem Einhalten der Qualität des gereinigten Abwassers.

Im internationalen **Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy sectors using Hydrogen** (RES: Reversible Energy Storage System) [31] wird im Rahmen eines Pilotprojektes auf Gran Canaria das Zusammenspiel von erneuerbaren Energien in autonomen Netzen geprüft und aufgrund einer dezentralen Stromerzeugung eine Wasserstoff-Speicherung ausgetestet. Nach einem Unterbruch der Arbeiten auf EU-Ebene ist nun vorgesehen, dass die durch die Schweiz eingebrachten Komponenten im 1. Quartal 2007 eingebaut werden.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Die wesentlichen *Eckpfeiler* für das *Forschungsprogramm Elektrizität 08 –11* konnten festgelegt und als Beitrag für das nationale Energieforschungskonzept zur Verfügung gestellt werden.

Im Bereich **Technologie** bei der *thermoelektrischen Energiekonversion* wird nun sowohl im applikatorischen als auch im materialwissenschaftlichen Bereich mit je zwei abgestimmten Projekten der gesamte Temperaturbereich untersucht, und mit den beiden im 2006 gestarteten Projekten im Bereich der *magnetokalorischen Energiekonversion* wird die Anwendung neuster Technologien untersucht. Die technologische Machbarkeit der *isothermen Druckluftspeicherung* konnte im Grundsatz nachgewiesen werden. Erweiterte Untersuchungen werden 2007 fortgeführt. Mit der Teilnahme am IEA Implementing Agreement im Bereich der *Hochtemperatursupraleitung (HTSL)* können die internationalen Entwicklungen auf diesem Gebiet beobachtet werden. Leider ist die schweizerische Industrie immer noch zögerlich im Bereich von HTSL-Projekten. 2007 wird deshalb erneut versucht, die Industrie zu entsprechenden Projekten zu motivieren, wobei hiefür die ermutigenden Erfolge im HTSL-Materialbereich förderlich sein dürften.

Bei den **effizienten Anwendungen** konnten die internationalen Aktivitäten zum *Code of Conduct bezüglich Settop-Boxen* mit einer helvetisierten Branchenvereinbarung national umgesetzt werden. Eine analoge Helvetisierung des *CoC für Breitbandgeräte* ist für 2007 vorgesehen und erste Signale der Industrie sind sehr ermutigend.

Nach längeren Vorarbeiten konnte im April 2006 im Wasserdispenser-Bereich mit den Branchenleadern eine schweizerische Vereinbarung unterzeichnet werden. Des weiteren wurde unter der Federführung der Schweiz und unter Einbezug der langjährigen Vorarbeiten per Ende 2006 ein europäischer CoC für USV-Anlagen fertig gestellt und von der EU und der einschlägigen europäischen Branche akzeptiert.

Mit dem Permanentmagnet-Motor und dem neuartigen Ansteuerungsverfahren für Schrittmotoren konnten Grundlagen für die Effizienzsteigerung im Antriebsbereich erarbeitet werden konnten. Es ist zu hoffen, dass deren Markteinführung erfolgreich wird. Schliesslich konnten die erforderlichen Grundlagen für die angestrebten Aktionen von *EnergieSchweiz* im Motorenbereich entwickelt und in einem BFE-Workshop diskutiert und bereinigt werden. Bedauerlich ist hingegen, dass das *Druckluft-Kompetenzzentrum* an der HTA Luzern nicht etabliert werden konnte.

In diversen Publikationen wurde in der einschlägigen Fachpresse über die Ergebnisse des Forschungsprogramms *Elektrizität* berichtet. Verschiedene Rückmeldungen haben bestätigt, dass der von der Programmleitung initiierte und im April 2006 ausgestrahlte Fernsehbeitrag im TV-Magazin *Mensch-Technik-Wissenschaft (MTW)* über die Erfolge der nationalen Vereinbarungen von Settop-Boxen und von Wasserdispensern auf vielseitiges Echo gestossen ist. Für 2007 wird den *umsetzungsorientierten Aktivitäten* unverändert starkes Gewicht beigemessen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 vorhanden (siehe www.electricity-research.ch)

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.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 Cooperative Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector** (JB)
- [2] R. Joho (reinhard.joho@power.alstom.com), ALSTOM, Birr: **Elektrische Maschinen, insbesondere Generatoren: Supraleiter-Technologie im Wettbewerb mit verbesserter, konventioneller Technologie** (SB)
- [3] K. Fröhlich, A. Bitsch, C. Eisenhut (fröhlich@eeh.ee.ethz.ch), ETH Zürich: a) **Das thermoelektrische Kraftwerk** (JB) • b) **Anwendungspotential der thermoelektrischen Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich** (JB)
- [4] A. Weidenkaff (anke.weidenkaff@empa.ch), EMPA, Dübendorf: a) **Geo-Thermopower (Geo-TEP)- Material** (JB) • b) **Materialentwicklung für solarthermische Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich**
- [5] P. Egolf, A. Kitanovski, O. Sari (peter.egolf@heig-vd.ch), HEIG-VD, Yverdon: a) **Anwendung der magnetischen Kältetechnik und ihre Bewertung** (JB) • b) **Anwendungen der magnetischen «Power Production» und ihre Bewertung** (JB)
- [6] P. Brückmann, I. Cyphelly, M. Lindegger (brueckmannelektronik@bluewin.ch), BRÜCKMANN ELEKTRONIK, Davos, CY-PHELLY & CIE, Les Brenets; CIRCLE MOTOR AG, Gümligen: a) **Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzepts BOP-B** (SB) • b) **Druckluftspeicherung: Optimierung / Ausmessung bestehende Projektmuster**
- [7] B. Aebischer, (baebischer@ethz.ch), CEPE, ETH, Zürich: **Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik** (JB) www.biblioite.ethz.ch
- [8] T. Schumann, (info@adhoco.com), ADHOCO AG, Winterthur: **Home Automation System** (SB)
- [9] A. Huser, T. Grieder (alois.huser@encontrol.ch), ENCONTROL GMBH, Niederrohrdorf: • a) **Energieeffizienzpotenzial von fest installierten Beamern** (SB) • b) **Verbrauchsabschätzung von Lampen in Privathaushalten** (JB) • c) **Elektrizitätsverbrauchsstatistik für elektrische Geräte in Haushalten** (JB)
- [10] J. Lindegger (info@circlemotor.ch), Circle Motor AG, Gümligen: a) **Wirtschaftlichkeit, Anwendung und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren** (SB) • b) **Funktionsmuster eines Integral-Sparmotors im Leistungsbereich < 1 kW** (JB) • c) **Effizienter Permanent-Magnet-Motor im Bereich 3 kW** (JB)
- [11] G. Schnyder, (gilbert.schnyder@sing.ch), SCHNYDER INGENIEURE AG, Hünenberg: a) **Erweiterung der LCC-Applikation mit Permanentmagnet-Motoren** (JB) •
- [12] R. Tanner, (tanner@semafor.ch), SEMAFOR INFORMATIK & ENERGIE AG, Basel: a) **Promot: Ein Werkzeug zur Entscheidungsfindung für Motorenbetreiber** (SB) • b) **Energieeinsparungen bei Ersatz von Getriebemotoren durch FU-Antriebe** (SB)
- [13] P. Kanyio, M. Bolla (mario.bolla@telma.ch), ECONODRIVES GMBH, Seftigen: a) **Energieeffiziente Lifte im Wohnbereich** (JB)
- [14] R. Gloor (gloor@energie.ch), GLOOR ENGINEERING, Sufers: **Energiesparmöglichkeiten mit intelligenten Stern-Dreieck-Schaltern** (SB)
- [15] S. Berchten (berchten@hispeed.ch), BERCHTEN ENGINEERING, Kloten: a) **Massnahmen zur Ausschöpfung des Energiesparpotenzials bei Schrittmotorenansteuerungen** (SB) • b) **Ersatz von pneumatischen und hydraulischen Antrieben: Potentialstudie** (SB)
- [16] P. Blattner (peter.blattner@metas.ch), BUNDESAMT FÜR METROLOGIE METAS, Bern-Wabern: **Qualität und Wirtschaftlichkeit von T5-Lampenadaptern** (JB)
- [17] U. Weilenmann, M. Friedl (urs.weilenmann@awtec.ch), AWTEC AG FÜR TECHNOLOGIE UND INNOVATION, Zürich: **Energiesparender, wäscheschonender Trockner** (SB)
- [18] A. Burri (adrian.burri@awtec.ch), AWTEC AG FÜR TECHNOLOGIE UND INNOVATION, Zürich: **Energiesparender Mini-Kühlschrank**
- [19] U. Zehnder (urs.zehnder@dplanet.ch) ZERO ENERGIE RESSOURCEN OPTIMIERUNG, Bellikon: **Standby-Verbrauch im Haushalt** (SB)
- [20] M. Meyer, S. Menth (markus.meyer@emkamatik.com), EMKAMATIK GMBH, Wettingen: **Potentialermittlung energieeffiziente Traktion bei den SBB** (JB)

Liste der P+D-Projekte / Umsetzungsprojekte

- [21] A. Huser, (alois.huser@encontrol.ch), ENCONTROL GMBH, Niederrohrdorf: a) **Merkblatt für eine effiziente Kühlung von KMU-Servern** (Merkblatt) • b) **Kühlung von EDV-Räumen in KMU-Betrieben** (SB) • c) **Erweiterung der Branchenvereinbarung Wasserdispenser** (SB)
- [22] R. Bachmann (ronny.bachmann@fnw.ch), FACHHOCHSCHULE NORDWESTSCHWEIZ, Muttens; **Energieeffiziente elektrische Antriebe in der Ausbildung** (SB)
- [23] B. Stadelmann, (bstadelmann@hta.fhz.ch), HTA LUZERN, Horw: **Aufbau des Druckluft Kompetenzzentrums an der HTA Luzern, Phase 1** (SB)
- [24] P. Radgen, (peter.radgen@isi.fhg.de), FRAUNHOFER INSTITUT, SYSTEMTECHNIK UND INNOVATIONSFORSCHUNG, Karlsruhe: **Druckluft Schweiz, Beitrag an Instrumentenentwicklung für die Kampagne 2005 – 2008** (SB)

- [25] J. Nipkow, (juerg.nipkow@arena-energie.ch), ARENA, ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIE-ALTERNATIVEN, Zürich: **Promotion und Koordination des EU Motor Challenge Programme** (JB) www.motorchallenge.ch
- [26] G. Schnyder, (gilbert.schnyder@sing.ch), SCHNYDER INGENIEURE AG, Hünenberg: a) **Technische Grundlagen effizienter Antriebssysteme** (SB) • b) **Weiterentwicklung des Code of Conduct für USV-Anlagen mit europäischen Gremien** (JB)
- [27] W. Baumgartner (w.baumgartner@basics.ch), BASICS AG, Zürich: **Massnahmen zum Stromsparen bei Elektromotoren: Marktanalyse** (SB)
- [28] E. Bush (bush@spin.ch), BUSH ENERGIE, Felsberg: **Energiemessungen von einphasigen USV-Anlagen**
- [29] H. Vetter, (winterthur@holingerag.ch), HOLINGER AG, Winterthur: **Energetische Optimierung der Klärschlammbehandlung** (SB)
- [30] B. Kobel, S. Kempf, (stefan.kempf@rysering.ch), RYSER INGENIEURE AG, Bern: **Messprogramm energetisch optimierter Beleuchtungsverfahren auf ARA** (SB)
- [31] A. Stoev, (a.stoev@idsag.ch), IDS AG, Zürich: **Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy sectors using Hydrogen** (JB)

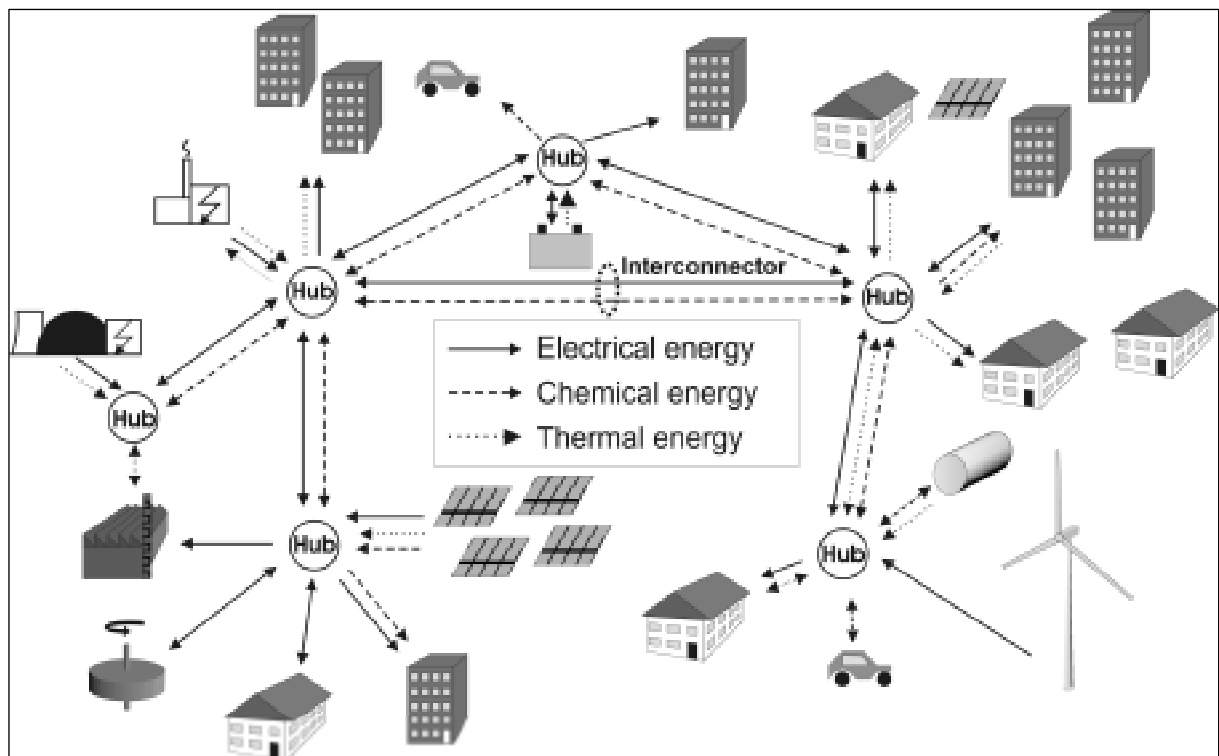
Referenzen

- [32] **Internetseite von EnergieSchweiz** und dem BFE www.energie-schweiz.ch
- [33] **Internetseite von Swiss Electric Research** (Organisation der schweizerischen Stromverbundunternehmen) www.swiss-electric-research.ch
- [34] **Internetseite der Energieagenturen** www.energieagentur.ch und www.energie-agentur.ch und www.eae-geraete.ch
- [35] **Internetzugriff der EU bezüglich den CoC-Aktivitäten** www.energyefficiency.jrc.cec.eu.int/html/standby_initiative.htm
- [36] **Internetseite des Motor Challenge Programms** www.motorchallenge.ch
- [37] **Internetseite des Forschungsprogramms** www.electricity-research.ch. Download von Zusammenfassungen, Jahres- und Schlussberichten durchgeführter Forschungsarbeiten

PROGRAMM NETZE

Thilo Krause

thilo.krause@bfe.admin.ch



Vision eines zukünftigen Energienetzes mit hoher Durchdringung erneuerbarer Quellen

Schweizer Forscher stellen sich die Frage, wie ein visionäres Energienetz aussehen könnte. In diesem Projekt kommen sogenannte «Energy Hubs» zur Anwendung, die es ermöglichen dezentrale und konventionelle Energieeinspeisungen miteinander zu koppeln. Die verschiedenen Energieformen können im «Energy Hub» ineinander umgewandelt oder auch gespeichert werden, um eine hohe Versorgungssicherheit und Kosteneffizienz zu gewährleisten (Quelle: ETH Zürich).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Entsprechend ihrer zentralen Lage in Mitteleuropa und im europäischen Stromverbund kommt der Schweiz die Funktion einer Stromdrehscheibe zu. Zieht man die ebenfalls stark genutzten Gaspipelines in Betracht, kann durchaus von einer Energiedrehscheibe gesprochen werden. Sowohl ändernde gesetzliche Bestimmungen innerhalb der Schweiz als auch die von der Europäischen Union (EU) lancierte Förderung eines europäischen Energiebinnenmarktes beeinflussen die Rahmenbedingungen für die Energieversorgung nachhaltig und stellen neue Ansprüche insbesondere im Netzbereich. Komplementär zum Wandel des legislativen Umfelds tragen auch technologische Entwicklungen und die drohende Verknappung von Energieträgern zu Veränderungen im Netzinfrastukturbereich bei.

Die Herauslösung der Netzforschung aus dem Programm «Elektrizität» und die weitergehende Schaffung eines eigenständigen Programmes «Netze» ab dem Jahr 2006 trägt dieser Dynamik Rechnung und unterstreicht das Forschungspotential in diesem Bereich. Grundsätzlich lassen sich die **Rahmenbedingungen** für das Programm «Netze» wie folgt umreissen:

- Auf Stromverteilnetzebene fortschreitende Durchdringung von dezentralen Energieeinspeisungen (Sonnenenergie, Geothermie, Windenergie, Biomasse, Kleinwasserkraft, Wärme-Kraft-Kopplung, etc.);
- Im Übertragungsbereich Zunahme der Energieflüsse infolge grenzüberschreitenden Stromhandels, daraus resultierend verstärkte Engpasshäufigkeit;
- Zunehmende Alterung der bestehenden Netzinfrastuktur;
- Wechselseitige Abhängigkeit von Netzbetrieb und Ausgestaltung offener Märkte;
- Übertragung, Verteilung und Konversion verschiedener Energieträger in parallelen Energieträgernetzen;
- Vermehrter Einsatz von Energiespeichern (Druckluftsysteme, Supercaps, etc.);
- Erhöhte Sensibilisierung von Stakeholdern für ökologische, ökonomische und soziale Aspekte.

Im Zusammenhang mit obigen Entwicklungen lassen sich die im folgenden Abschnitt skizzierten **Forschungsschwerpunkte** identifizieren.

Im Zusammenhang mit obigen Entwicklungen sind einerseits die **Auswirkungen des sich verändernden** technologischen, ökonomischen und legislativen **Umfelds auf Netzbetrieb und Versorgungszuverlässigkeit** zu untersuchen. Ange-

strebt wird andererseits auch die **Konzeption von neuartigen Netzinfrastrukturen** (transnational bis regional) 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, langfristigem Netzausbau und der Abhängigkeit von Gas-, Strom- und Wärmenetzen zu bearbeiten. Die Forschung ist an den Kriterien Versorgungszuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit auszurichten, um die verschiedenen Stakeholderansprüche zu repräsentieren. Sozioökonomische Fragestellungen wie Preisgerechtigkeit sind zu berücksichtigen.

Obige Schwerpunkte können vor allem als längerfristige Fokussierung des Programms gesehen werden, wobei sich **kurz- und mittelfristig die folgenden Ziele** ableiten lassen:

ELEKTRIZITÄTSNETZE

- **Modellierung und Evaluation** von Wechselwirkungen hinsichtlich Netzbetrieb und -design, Versorgungszuverlässigkeit und Organisation des Elektrizitätsmarktes
- **Praxisnahe Bewertung** von ökonomischen und technischen Wechselwirkungen bei marktbasierten Engpassmanagementsystemen und beim Netzausbau
- **Analyse** der Versorgungszuverlässigkeit mit Berücksichtigung liberalisierter Marktarchitekturen
- **Systemkonzeption** für effizientes und sicheres Netzmanagement

GEKOPPELTE ENERGIEKETZEN (ELEKTRIZITÄT, GAS, WÄRME)

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

TECHNOLOGIEN FÜR ENERGIEKETZEN

- **Flexible Energieflusssteuerungen** (FACTS)
- **Effizienzsteigernde Verteil- und Übertragungselemente**

Im Rahmen des bisherigen Programmes «Elektrizität» lagen die Schwerpunkte im Bereich «Netze» bei der Erarbeitung von Grundlagen zu gekoppelten Energienetzen, bei Arbeiten zur pra-

xisnahen Integration von dezentralen Quellen in Verteilnetze und beim Entwurf von Simulationssoftware für Netzsysteme. Die bereits initiierten

Projekte sollen die Basis für ein wachsendes Forschungsnetzwerk im Programm «Netze» sowohl innerhalb der Schweiz als auch in Europa bilden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

Die im Folgenden beschriebenen vier Projekte werden im Rahmen des Programms «Netze» durch das Bundesamt für Energie kofinanziert. Im Anschluss an die Projektbeschreibungen wird ein kurzer zusätzlicher Abriss zu allgemeinen Entwicklungen innerhalb des Forschungsplatzes Schweiz gegeben.

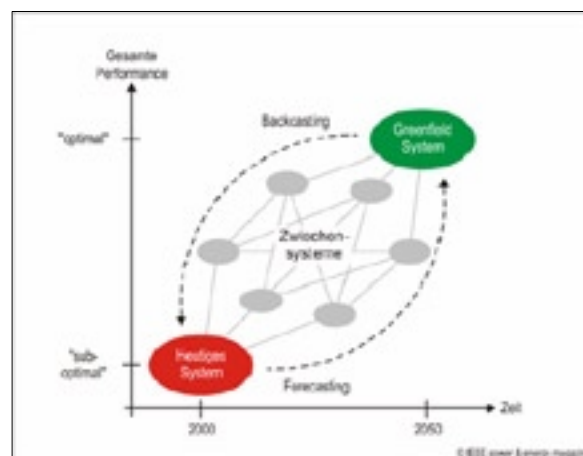
Das Projekt **Vision of Future Energy Networks (VoFEN)** [1] wurde 2004 lanciert und zielt auf die **Erstellung von Szenarien für zukünftige Energiesysteme** ab. Eine zentrale Rolle im Projekt nimmt der in den Vorjahren entwickelte «Energy Hub» ein, der es ermöglicht, die Erzeugung aus einer bestimmten 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. Die in den Vorjahren geleisteten Arbeiten zur Beschreibung der Energieflüsse im System und zur Speichermodellierung sind 2006 wie folgt erweitert worden:

- **Zuverlässigkeitsmodellierung** (Ziel: Evaluation von Hubarchitekturen im Hinblick auf eine gesteigerte Versorgungszuverlässigkeit durch Einbeziehung von Synergien zwischen Konversion, Speicherung und Verteilung)
- **Multi-Energieträgerübertragung** (Ziel: gleichzeitige Übertragung verschiedener Energieformen in einem einzigen Übertragungskanal, d.h. von elektrischer, chemischer und thermischer Energie)
- **Systemmodellierung und -optimierung** (Ziel: Entwicklung statischer Lastflussmethoden und Erstellung allgemeiner Energiespeichermodelle zur Mehrperioden- und Netztopologieoptimierung)
- **Integration der Theorie der Energiespeicherung** (Ziel: Darstellung von Einfluss und Nutzen von verteilt installierten Energiespeichern unter Einbezug stochastischer Verfügbarkeit der Energiequellen)

Das Projekt **VoFEN** hat die Arbeit in den letztjährig definierten Arbeitspaketen entsprechend fortgesetzt. Primäres Ziel blieb die Entwicklung, Modellierung und Analyse neuartiger Netzstrukturen mit hoher Durchdringung dezentraler Quellen (Figur 1). Die gefundenen Modelle und Methoden sind dahingehend erweitert worden, dass sie in einem weiteren Projektstadium durch Fallstudien auf ihre Anwendbarkeit in der Praxis untersucht

werden können. Für das Jahr 2007 sind darüber hinaus die folgenden Arbeitspakete definiert worden:

- **Fallstudie Energy Hub Baden, Schweiz** (Ziel: Identifikation von Synergieeffekten hybrider Energieerzeugung, -übertragung, -speicherung und -konversion am Beispiel der Stadt Baden)
- **Ökonomische Bewertung neuartiger Energienetztopologien** (Ziel: Analyse ökonomischer Effekte bei der Konzeption hybrider Energiesysteme unter Anwendung finanzmathematischer Methoden wie zum Beispiel der Portfoliotheorie)
- **Dynamische Modellierung und Regelung** (Ziel: Entwicklung dynamischer Modelle für die einzelnen Hubkomponenten und anschliessendes Studium der Dynamik des Gesamtsystems)



Figur 1: Übergang von einem heutigen Energiesystem zu einer zukünftigen Topologie (Quelle: ETH Zürich/ IEEE Power & Energy Systems).

Während beim Projekt **Vision of Future Energy Networks** zukünftige Strukturen von Energiesystemen im Vordergrund stehen, beschäftigt sich das Projekt **Verteilte Erzeugung in Niederspannungsnetzen (VEiN)** [2] mit der **Integration erneuerbarer Quellen** (Sonne, Wind, Biomasse und Kleinwasserkraft) in bestehende Elektrizitätsnetze, speziell in Niederspannungsnetze (400V) (Figur 2). Auch die Auswirkungen des Einsatzes von Brennstoffzellen und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen in Niederspannungsnetzen sollen

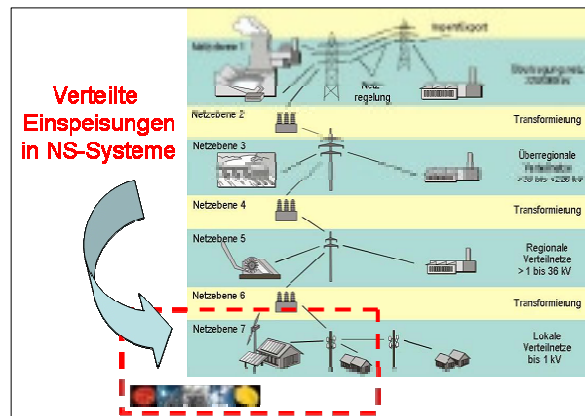
evaluiert werden. Zu klären sind Fragen des Netzbetriebs im Normal- oder Störfall, der Planung und Dimensionierung von Betriebsmitteln, um eventuell notwendig Anpassungen hinsichtlich Normung und gängiger Dimensionierungspraxis frühzeitig zu erkennen. Das Projekt **VEiN** besass im Jahr 2006 den Status eines Vorprojektes mit dem Ziel Arbeitspakete für eine Pilotphase zu evaluieren. Dahingehend wurden u.a. die folgenden Schwerpunkte bearbeitet:

- Identifikation eines 400 V Netzausschnittes für die Realisierung der Pilotanlage
- Vertiefte Konkretisierung der zu bearbeitenden Themenschwerpunkte und Aufgabenstellungen wie z.B. Sicherheitsanforderungen, Bedarf an Steuerung und Regelung, Auswirkungen auf Schutzelemente etc.
- Ermittlung von Projektpartnern seitens der Industrie und der Hochschulen
- Evaluation zu berücksichtigender dezentraler Erzeugungsanlagen für eine Installation

Entsprechend der Schwerpunkte konnte im Berichtszeitraum ein geeigneter Netzausschnitt für das Pilotprojekt bestimmt werden. Als Betriebs-szenarien wurden das Verhalten bei Normal-, Hoch- und Schwachlast identifiziert. Auch für den Betrieb im Störfall wurde ein Szenario bestimmt, wobei ein eventueller Inselbetrieb erst in zweiter Priorität untersucht wird. Im Zusammenhang mit relevanten und am Markt vorhandenen Anlagen zur dezentralen Stromerzeugung sind Blockheizkraftwerke, Solaranlagen, Sterlingmotoren, sowie Sonnenwärminstallationen und Mikrogasturbinen in Betracht zu ziehen. Hinsichtlich der Installation dieser Anlagen im definierten Netzausschnitt wurde Kontakt mit geeigneten Kunden aufgenommen, um die praktische Machbarkeit zu klären. Die Netzstruktur wurde in einem Simulationsprogramm erfasst und die späteren Messungen vorbereitet.

Für das Jahr 2007 sind diverse Arbeitspakete weiter konkretisiert worden. Darunter fallen die Evaluation potentieller dezentraler Erzeugungsanlagen hinsichtlich Art, Leistung und Dimensionierung genauso wie weitere Standortevaluationen, Vorprojekte zu konkreten Installationsfragen und Simulationen. Von erhöhter Wichtigkeit ist im Jahr 2007 die Identifikation von möglichen Projektpartnern aus akademischer Sicht, d.h. von einer Hochschule oder Fachhochschule. Die zukünftige Integration einer solchen Institution soll es ermöglichen, die konkrete Anlagenimplementierung im Rahmen des Pilotprojekts auch hinsichtlich allgemeiner, theoretischer Schlussfolgerungen zu untersuchen.

Ziel des Projekts **Conception et intégration d'un logiciel FEM dans le simulateur numérique**



Figur 2: Überblick über den Einsatz von verteilten Einspeisungen in 400 V Niederspannungsnetzen (Quellen: VSE, Projekt VEiN).

SIMSEN [3] ist die Einbindung von Feldberechnungen in das Softwarepaket SIMSEN, einem Programm zur Analyse von Systemen mit steuerbaren Antrieben. Zur effizienten Modellierung von Synchronmaschinen am Netz kommt die Methode der finiten Elemente zur Anwendung. In diesem Zusammenhang wurde evaluiert, welche Ansätze geeignet erscheinen, um Sättigungseffekte im Softwarepaket SIMSEN darzustellen. In einem nächsten Schritt ist der gewählte Modellierungsansatz zu implementieren, um Simulationen zu ermöglichen. Das Projekt wird im Jahr 2007 mit dem Ziel abgeschlossen, ein vertieftes Verständnis des Sättigungsverhaltens von Synchronmaschinen und dessen Auswirkungen auf das Netz zu erhalten.

Das Projekt **Conception de Systèmes de Chauffage urbain pour la Cogénération** zielt darauf ab optimale Betriebsstrategien für ein gekoppeltes Netz aus Fernwärme, Elektrizität und Warmwasser abzuleiten (Figur 3). Im Berichtsjahr wurde innerhalb des Projektes eine Vorstudie durchgeführt, wobei mit Hilfe eines am Centre de compétence en urbistrique (CREM) entwickelten *Softwaretools* die Energieversorgung des Quartiers Morasses in Martigny analysiert wurde. Zu diesem Zweck wurden Daten betreffs Verbrauchscharakteristika und zur Verfügung stehender Technologien erhoben. In einem zweiten Schritt wurden die gesammelten Daten dahingehend benutzt, eine Optimaltopologie für das Quartier Morasses zu bestimmen. Unter Auswertung der Jahre 1980 bis 1990 identifizierte das *Softwaretool* die aktuelle Topologie als ökonomisch effizienteste Alternative. Das Ziel der Kostenoptimierung wurde in einem weiteren Schritt um die Dimension Nachhaltigkeit erweitert. Die Simulationsresultate zeigen, dass eine Kopplung verschiedener Energieformen mit Hilfe von z.B. Kraftwärmekopplung Effizienzgewinne liefert und ein signifikantes Einsparpotential hinsichtlich CO₂-Emissionen besteht. Die Ergebnisse der Vorstudie werden im April 2007 in einem Workshop

Über obige Projektaktivitäten hinaus wird in der Schweiz sowohl in den Hochschulen als auch im industriellen Umfeld zum Thema «Netze» geforscht. Zusätzlich konnten für das Berichtsjahr folgende ausgewählte Schwerpunkte und Projekte identifiziert werden (nähere Information soweit öffentlich und verfügbar):

- bezüglich ein Projekt zur Entwicklung eines Marktsimulators lanciert, der es ermöglicht, verschiedene Marktarchitekturen und Engpassmanagementmethoden (Knotenpreissysteme, Zonensysteme, explizite Auktionen) zu untersuchen. Der Simulator erlaubt es strategisches Teilnehmerverhalten genauso wie perfekt kompetitive Märkte zu evaluieren. Der Abschlussbericht wird im Laufe des Jahres 2007 in Form zweier Dissertationen publiziert.

- Programm Netze

Nationale Zusammenarbeit

Im Rahmen der beschriebenen Forschungsprojekte kam es zu den folgenden nationalen Kooperationen:

- Das Projekt **Vision of Future Energy Networks (VoFEN)** arbeitete zusammen mit: ABB (Business area: medium voltage products, Zürich) und ABB Corporate Research (Dättwil), Swisspower, den Regionalwerken Baden und der Stiftung Novatlantis.
- Innerhalb des Projektes **Verteilte Einspeisungen in Niederspannungsnetze (VEiN)** wurde zusammengearbeitet mit: AEW Energie AG, BKW FMB Energie AG, Centralschweizerische Kraftwerke (CKW), Elektrizitätswerk des Kantons Zürich (EKZ), Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (EWZ), Wasserwerke Zug AG (WWZ), Industrielle Werke Basel (IWB).
- Das Projekt **Conception et intégration d'un logiciel FEM dans le simulateur numérique SIMSEN** kooperiert mit: Alstom Power Swit-

zerland (Birr), BKW FMB AG, EOS, EEF und SEL.

- Das Projekt **Conception de systèmes de chauffage urbain pour la cogénération** wurde realisiert in Zusammenarbeit mit dem Laboratoire d'énergie industrielle (EPFL/STI-ISE-LENI).

Ausserhalb obiger projektbezogener Kooperationen ist ein reger Austausch zwischen Hochschulen, Fachhochschulen, Forschungsinstituten und der Privatwirtschaft im Bereich Netze zu verzeichnen. Zu nennen sind u.a. die regelmässig initiierten **Vortragsreihen am Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik der ETH Zürich** [10] mit internationalen Referenten aus der Industrie und von Hochschulen. Auch das *Energy Science Center* der ETH Zürich [11] und das *Energy Center* der EPF Lausanne [12] laden regelmässig zu Kolloquien ein, die den Dialog im Bereich Netze fördern.

Internationale Zusammenarbeit

Wie bereits in der Einführung dargestellt, kommt der Schweiz im Europäischen Energieverbund die Funktion einer Energiedrehscheibe zu. Diese «physikalische» Vernetzung mit den Nachbarländern unterstreicht die Notwendigkeit einer institutionellen Vernetzung, d.h. der Kooperation mit internationalen Partnern seitens der Industrie, der Hochschulen, Regulatoren etc. Derartige Zusammenarbeiten ermöglichen die Bündelung von ähnlichen nationalen Interessen, erleichtern aber auch das Verständnis teils abweichender Haltungen.

Initiiert durch das Projekt **Vision of Future Energy Networks** kam es zu Kooperationen mit der Norwegian University of Science and Technology (SINTEF) in Trondheim, mit der Technischen Universität Delft, Niederlande, mit der RWTH Aachen, Deutschland und mit der Universität Castilla la Mancha, Spanien.

Das Programm Netze ist sowohl durch den Bereichs- als auch durch den Programmleiter innerhalb der europäischen **Technologieplattform Smartgrids** [13] 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. Die Plattform *Smartgrids* hat im Berichtszeitraum eine strategische Forschungsagenda entworfen, die die Standpunkte wichtiger Stakeholder konsolidiert. Die Erstellung der **strategischen Forschungsagenda** wurde durch den Bereichsleiter begleitet. In diesem Zusammenhang ist das Programm «Netze» in der Plattform nicht nur präsent,

sondern wird auch gestaltend tätig. Regelmässig tagendes Gremium der Plattform ist neben dem *Advisory Council*, die so genannte *Mirror Group*, in der Dr. Rainer Bacher (Bereichsleiter Netze am BFE) die Position des Vizepräsidenten einnimmt. Die langfristige innereuropäische Zusammenarbeit mit der Technologieplattform *Smartgrids* wird auch zukünftig ein fester Bestandteil des Programms Netze sein.

Auch im **IEA Implementing Agree Electricity Networks Analysis, Research and Development (ENARD)** [14] ist das Programm Netze aktiv beteiligt¹. ENARD wurde in der zweiten Hälfte des Berichtsjahres gegründet und hat es sich zum Ziel gesetzt als Expertenorganisation Elektrizitätsnetze zur Unterstützung der International Energy Agency (IEA) zu fungieren. Diese Funktion beinhaltet das Sammeln und Aufbereiten von Daten in den Mitgliedsstaaten, die Bestimmung von Schwerpunkten im Bereich Netzforschung und Entwicklung, die Politikberatung als auch allgemein die Lancierung von Aktivitäten hinsichtlich der Entwicklung von Strategien für nachhaltige Elektrizitätsnetze. Im Jahr 2007 sind Expertentreffen geplant, um die Plattform weiter zu entwickeln und die definierten Aufgaben wahr zu nehmen. Das Programm Netze ist hier bereits integriert und wird auch weiterhin eine aktive Rolle einnehmen. Unterstrichen wird dies durch die Funktion von Dr. Rainer Bacher als Vizepräsident des *Executive Committees*.

¹ Mitgliedsländer (Stand Februar 2007) sind: Belgien, Dänemark, Finnland, Grossbritannien, Italien, Norwegen, Österreich, Schweden und die Schweiz.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Rahmen des Projektes **Conception de Systèmes de Chauffage urbain pour la Cogénération** werden u.a. Arbeiten geleistet, die Demonstrationscharakter haben. Diesbezüglich sind mit Hilfe eines *Softwaretools* Simulationen bezüglich Topologieoptimierung und Regelstrategien für das Energienetz des Stadtquartiers Morassess in Martigny erarbeitet wurden.

Im Rahmen des Projektes **Vision of Future Energy Networks (VoFEN)** ist darüber hinaus geplant, eine Fallstudie mit der Stadt Baden durchzuführen,

d.h. die theoretisch gefundenen Erkenntnisse zu Multi-Energieträgernetzen auf ein reales Subnetz zu übertragen.

Auch das Projekt **Verteilte Einspeisungen in Niederspannungsnetze (VEiN)** hat bereits 400 V Netzausschnitte identifiziert, in denen dezentrale Energieerzeugungsanlagen installiert werden sollen. Der Vergleich und die Bewertung von Modellierungsergebnissen und realen Messungen stehen zukünftig im Zentrum der Untersuchungen.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Mit der Schaffung des Programmes «Netze» sind zahlreiche neue Forschungsaufgaben zu bewältigen, wobei die konkreten Ziele bereits in der Einführung umrissen wurden. Es gilt in den Feldern Elektrizitätsnetze, gekoppelte Energienetze und Technologien für Energienetze tätig zu werden. Vor allem ersteres und letzteres Gebiet bedürfen vermehrter Anstrengungen, wobei hinsichtlich der gekoppelten Energienetze mit den Projekten **Vision of Future Energy Networks (VoFEN)**, **Verteilte Einspeisungen in Niederspannungsnetze (VEiN)** und **Conception de systèmes de chauffage urbain pour la cogénération** bereits eine

sehr gute Basis geschaffen wurde. Das Projekt **VoFEN** wurde dabei nicht nur national, sondern auch international wahrgenommen. Dazu beigetragen haben zahlreiche Veröffentlichungen in internationalen Journalen oder auf Konferenzen. Mit der **Technologieplattform Smartgrids** und dem **IEA Implementing Agreement ENARD** ist der Grundstein für verstärkte innereuropäische Programmaktivitäten gelegt. Das Programm «Netze» hat damit sowohl national als auch international die Arbeit aufgenommen und wird sich in Zukunft verstärkt in den oben identifizierten Kernbereichen engagieren.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 vorhanden

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

Unter den angegebenen Internet-Adressen sind weitere Informationen verfügbar.

- [1] G. Andersson, K. Fröhlich, (andersson@eeh.ee.ethz.ch), Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zürich, **Vision of Future Energy Networks** (JB).
- [2] P. Bühler, G. Schnyder (gilbert.schnyder@sing.ch), Schnyder Ingenieure, **Verteilte Energieeinspeisung in Niederspannungsnetze** (JB).
- [3] J.J. Simond, (jean-jacques.simond@epfl.ch), EPF Lausanne, **Conception et intégration d'un logiciel FEM dans le simulateur numérique SIMSEN** (JB).
- [4] Gaetan Cherix, (gaetan.cherix@crem.ch), Centre de compétence en urbistrique, **Conception de Systèmes de Chauffage urbain pour la Cogénération** (JB).

Referenzen

- [5] Th. Krause, (krause@eeh.ee.ethz.ch), Power Systems Laboratory, ETH Zürich: **Evaluating Congestion Management Schemes in Liberalized Electricity Markets Applying Agent-based Computational Economics**. Online verfügbar: <http://www.eeh.ee.ethz.ch/psl/forschung/krauseproj.html>
- [6] G. Andersson, (andersson@eeh.ee.ethz.ch), Power Systems Laboratory, ETH Zürich: **Platzierung von FACTS Geräten im elektrischen Energieübertragungsnetz**. Informationen: <http://www.eeh.ee.ethz.ch/psl/>
- [7] ABB Corporate Research Dättwil: **Produkt- und Konzeptentwicklung im Bereich Wide Area Monitoring and Control (WAMC)**, Kontakt: <http://www.abb.ch/cawp/chabb119/cba461b6166b5b0cc1256b2a00558bd6.aspx>
- [8] M. Filippini, (mfilippini@ethz.ch), Centre for Energy Policy and Economics, ETH Zürich, **A Benchmarking Analysis of Electricity Distribution Utilities in Switzerland**, Online verfügbar: http://www.cepe.ch/download/cepe_wp/CEPE_WP43.pdf
- [9] K. Fröhlich, (froehlich@eeh.ee.ethz.ch), Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, **Akustische Emissionen von Hochspannungsleitungen**: Online verfügbar: <http://www.eeh.ee.ethz.ch/hvl/forschung/conor.html>
- [10] **EEH - Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik**: Online verfügbar: <http://www.eeh.ee.ethz.ch>
- [11] **Energy Science Center der ETH Zürich**: Online verfügbar: <http://www.esc.ethz.ch>
- [12] **Energy Systems Chair and Energy Center der EPF Lausanne**: Online verfügbar: <http://cgse.epfl.ch/page62251-en.html>
- [13] **Technologieplattform Smartgrids** (European Technology Platform for the Electricity Networks of the Future), Online verfügbar: <http://www.smartgrids.eu>
- [14] **IEA Implementing Agreement – Electricity Networks Analysis, Research and Development (ENARD)**, Online verfügbar: <http://www.iea-enard.org>

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM UMGEBUNGSWÄRME, WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG, KÄLTE

Thomas Kopp, Max Ehrbar, Fabrice Rognon

tkopp@hsr.ch, ehrbar.max@bluewin.ch, fabrice.rognon@bfe.admin.ch



Die 100'000-ste Wärmepumpe ging am 1. September 2006 im Schloss Bursins in Betrieb

Mit einer Veranstaltung auf dem Schloss Bursin im Beisein von Fernsehen und Presse wurde die Inbetriebnahme der 100'000-sten Wärmepumpe in der Schweiz gefeiert.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

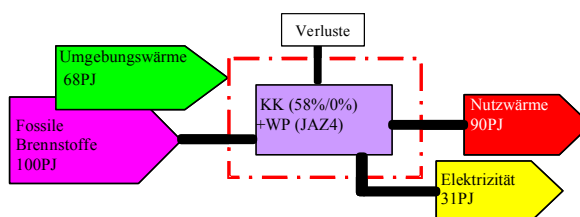
Die Bereitstellung von Wärme in der Schweiz erreicht einen Anteil von rund 50 % der gesamten Energienutzung [29]. Diese Niedertemperaturwärme für Raumheizung und Warmwasserbereitung wird zu rund 90 % aus fossilen Brennstoffen erzeugt. Dabei werden Kohlendioxid und Schadstoffe produziert. Im Bestreben, diese Emissionen zu senken, ist die saubere Verbrennung von flüssigen und gasförmigen Brennstoffen zu verbessern und eine substantielle Substitution mit Wärmepumpen anzustreben.

Elektrisch angetriebene Wärmepumpen können den fossilen Brennstoffverbrauch und damit auch den Kohlendioxid-Ausstoss signifikant vermindern, sofern die elektrische Energie CO₂-neutral erzeugt wird (z.B. mit Wasserkraft oder Kernenergie).

Auch wenn die Erzeugung der elektrischen Energie durch moderne thermische Kombi-Kraftwerke (Kopplung von Gasturbinen und Dampfturbinen-Anlagen mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 58 %) erfolgt, lassen sich substanzielle Reduktionen des CO₂ Ausstosses erzielen [30]. Zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme mit der Kombination von Wärmepumpen und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WP+WKK) wie auch mit der Kombination von Wärmepumpen und Kombi-Kraftwerken (WP+KK) kann gegenüber der heute noch weit verbreiteten Kesselheizung **30% bis 50% an Brennstoff eingespart werden**. Damit wird natürlich auch die **CO₂-Produktion entsprechend reduziert**.

Es lässt sich auch eine andere Überlegung anstellen [30]. Wenn man die gleiche Menge fossile Energieträger in der Schweiz, die in Gas- und Oelkesseln bisher zum Zweck der Raumheizung verbrannt wurden, neu mittels einer Kombination von Kombikraftwerk + Wärmepumpe umsetzen würde, könnte aus diese Menge fossile Energie gleichzeitig zur erzeugten Wärme auch zusätzlichen 31 % elektrische Energie bereitgestellt werden (Figur 1). Bei einer Kombination von Wärme-Kraft-Kopplung + Wärmepumpen wären es zusätzlichen 25 % elektrische Energie. Hier zeigt sich wieder einmal, dass die direkte Verbrennung von chemischer Energie den exergetisch ungünstigsten Fall darstellt. Chemische Energie sollte immer zuerst in mechanische Energie bzw elektrische Energie umgewandelt werden. Da theoretischen Lösungswege für eine nachhaltige CO₂-Reduktion bekannt sind, ist das effektive Erreichen einer Reduktion abhängig von der zeitlichen Umsetzung. Da Kombikraftwerke nur im MW-Massstab wirtschaftlich betrieben werden können und auch WKK-Anlagen erst ab mehreren 100 kW wirtschaftlich sind, ist ein Umdenken von den heutigen Kleinst-Heizungsanlagen zu grösseren Stromerzeugungsanlagen und vielen dezentralen Wärmepumpen notwendig. Die grösseren Strom-

erzeugungsanlagen sollten nur an Orten aufgestellt werden, wo auch eine Abwärmenutzung möglich ist.



Figur 1: Energiefluss der Kombination von Kombi-Kraftwerken (KK) und Wärmepumpen (WP). Aus 100% fossiler Energieträger können Nutzwärme mit einem Effizienzgrad von 90%, und gleichzeitig elektrische Energie mit einem Effizienzgrad von 31%, bereitgestellt werden. Das Kombikraftwerk hat einen elektrischen Wirkungsgrad von 58% mit 0 % Abwärmenutzung und die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe beträgt 4.0.

Das Hauptgewicht der Aktivitäten des Programms *Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte* wurde in Abstimmung mit der CORE festgelegt [31] und liegt bei der Verbesserung und Erweiterung des Einsatzbereiches und bei der Erhöhung der ökologischen Akzeptanz von Wärmepumpen und WKK-Anlagen.

Im Jahr 2006 wurden folgende konkrete Schwerpunkte bearbeitet:

- Verbesserung der **Integration von Wärmepumpen in Gebäude-Gesamtsysteme** durch verbesserte Regelstrategien und vereinfachte Einbindungs-Schaltungen auch für die Anwendung der Warmwasser-Bereitung;
- Verbesserung der Integration von **Wärmepumpe in MINERGIE und MINERGIE-P-Gebäuden**;
- Verbesserung der **Methoden zur physikalisch richtigen Leistungsmessung**;
- Ausbau der Möglichkeiten des **Einsatzes von natürlichen Kältemitteln** wie Ammoniak und CO₂ und Optimierung von Komponenten für den Einsatz dieser Arbeitsmedien in Wärmetauschern und Erdsonden;
- Konzeptionierung einer **magnetischen Wärmepumpe für den Einsatz in der Schweiz**;
- Verbesserung der **Nutzung von neuen Wärmequellen** wie Abwasserkanäle und der Nutzungsmöglichkeiten der Umgebungsluft;
- Verbesserung der **Leistungszahl von Grosswärmepumpen**;
- Verbesserung der **Leistungszahlen von Kälteanlagen**.

Im Programm «Pilot- und Demonstrationsanlagen» werden Projekte im Bereich Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung und Kälte gefördert, die entweder erstmals im Feld angewendet (Pilot-Projekte) oder deren technische Reife bereits nachgewiesen ist und deren Nachahmung speziell erwünscht ist (Demonstrations-Projekte). Seit 2002 werden vor allem Grossanlagen von Wärmepumpen, kombinierte Anlagen für Heizung

und Kühlung, und Abwasser als Wärmequelle für Wärmepumpen gefördert. Die Förderung besteht (resp. bestand) aus Finanzbeiträgen und Messaufträgen zum Nachweis der energetischen und betrieblichen Qualität eines Projektes. Das Programm wird seit Ende 2004 herunter gefahren. Neue Anlagen kommen seit 2004 nicht mehr dazu. Die letzten Anlagen wurden im Jahr 2006 aus der Programmaufsicht entlassen.

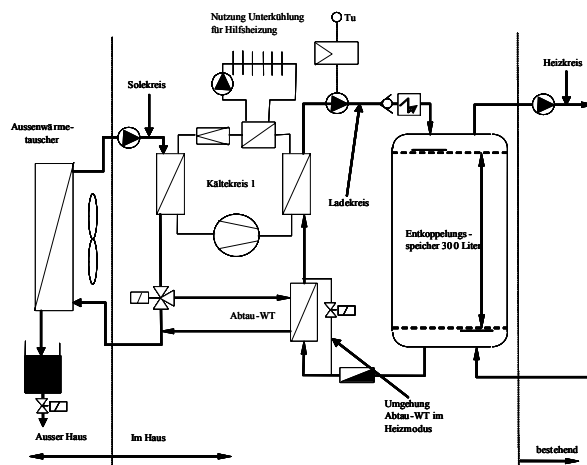
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

WÄRMEPUMPEN

Es hat sich in den vergangenen Jahren gezeigt, dass die Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Wärmepumpen nicht mehr nur einzeln betrachtet werden kann, sondern dass das zu beheizende Objekt in die Verbesserungsprozesse einbezogen werden muss. Dies gilt sowohl für Heiz-Wärmepumpen, wie auch für reine Brauchwasser-Wärmepumpen. Das Projekt **Warmwasserbereitung mit Wärmepumpen** [1] lieferte im Jahre 2006 erste Ergebnisse aus Messungen an einer Versuchsanlage in Rohrschacherberg und wird im Frühling 2007 abgeschlossen. Das Laden eines 1200-Liter-Boilers über einen innenliegenden und über einen aussenliegenden Wärmetauscher wurde untersucht. Die Wärmezufuhr erfolgte durch 1 oder 2 identische Wärmepumpen, die auch die Beheizung des 7-Familien-Mehrfamilienhauses übernehmen. Als Wärmequelle dienten Erdsonden. Die beste Arbeitszahl für den Ladevorgang wurde mit 3.33 beim aussenliegenden Wärmetauscher, gespeist von 1 Wärmepumpe, erreicht. Es zeigte sich aus einer zusätzlichen Berechnung, dass eine sekundärseitige Laderegulierung nur zu einer Arbeitszahl von 2.63 führt.

Die Integration von Wärmepumpen in Gebäude wurde im Rahmen des ehemaligen BFE-Projektes *Standard-schaltungen von Wärmepumpenanlagen* (STASCH) [32] untersucht. Darauf beruhend wurden Einbindungsrichtlinien für die Praxis empfohlen. Besonders Luft/Wasser-Wärmepumpen zeigen bei höheren Aussentemperaturen eine hohe Wärmeabgabeleistung. Dadurch steigt auch die mittlere Temperaturdifferenz über den Kondensator, und die Heizwassertemperatur bleibt hoch. Dies führt zu einem schwächeren COP (Coefficient of performance) und dadurch auch zu einer erheblich tieferen Jahresarbeitszahl. Eine neue Idee besteht darin, den Heizwassermassenstrom im Kondensator in Abhängigkeit der Aussentemperatur zu variieren, und somit eine zeit-unabhängige Temperaturzunahme des Wassers beim Durchströmen und eine gleichbleibendes LMTD (Mittlere treibende Temperaturdifferenz) über den Kondensator zu erreichen. Im Projekt **Witterungsgeführter Ladekreis** [2] werden 2 Luft/Wasser-Wärmepumpen in Split-Ausführung

messtechnisch untersucht. In den bisherigen Projektphasen konnten die Messeinrichtungen eingebaut und in Betrieb genommen werden. Im Verlauf des Projektes sollen an beiden Objekten die Leistungsfähigkeit mit der klassischen und der neuen Betriebsweise je während einer halben Heizsaison verglichen werden. Aus theoretischen Abschätzungen erwarten die Autoren eine erhebliche Verbesserung der Jahresarbeitszahl von bis zu 20 %. Auch das Abtauverhalten mit Warmwasserabtauung kann in diesem Projekt feldmässig untersucht werden. Figur 2 zeigt das Anlagenschema. Dabei wird das Ladekreis-Heizungswasser auf einen Abtauwärmetauscher geleitet, der im Solekreislauf des Luftkühlers angeordnet ist.



Figur 2: Schema der untersuchten Wärmepumpen-Anlage mit dem witterungsgeführten Ladewasserstrom. Die Regulierung geschieht durch die Elemente in der Mitte oben, wo die Umgebungstemperatur T_u auf den Regler der Umwälzpumpe im Ladekreis einwirkt.

Die Qualitätssicherungsmassnahmen der Branche, zusammen mit den Anstrengungen der Fördergemeinschaft Wärmepumpe Schweiz (www.fws.ch) und den Prüfkativitäten des Wärmepumpen-Testzentrums WPZ Buchs (www.wpz.ch), haben massgeblich dazu beigetragen, dass die Wärmepumpen eine gute Effizienz und eine kundenfreundliche hohe Betriebssicherheit erreicht

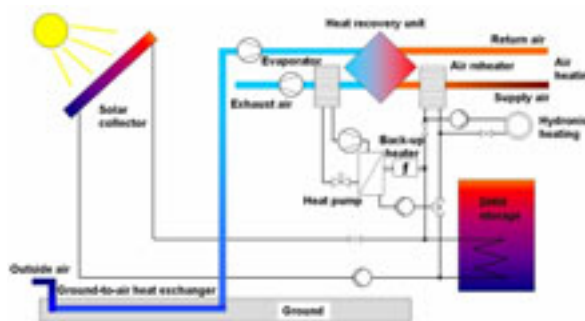
haben. Das Projekt **QS-WP/QP Qualitätsprüfung von Klein-Wärmepumpen mittels Norm- und Feldtestmessungen, Teilprojekt Effizienzsteigerung (Bestanlagen)** [3] untersucht die zeitliche Entwicklung der Effizienz von Luft/Wasser-Wärmepumpen, Sole/Wasser-Wärmepumpen und Wasser/Wasser-Wärmepumpen der am WPZ nach Prüfnorm EN 14511 und nach EN 255-3 geprüften Wärmepumpen. Im Berichtsjahr wurde eine Stagnation, bei einigen Luft/Wasser-Wärmepumpen sogar ein leichter Rückgang, des COP festgestellt. Alle geprüften Wärmepumpen übertrafen aber den Gütesiegel-Grenzwert von 3.0 für Luft/Wasser-Wärmepumpen. Diese Stagnation in der Effizienzentwicklung von Wärmepumpen ist sehr bedauerlich, und kann aber durch den Kostendruck des Marktes erklärt werden. Hier muss betont werden, dass die energetische Verbesserung der Wärmepumpen nach wie vor ein wichtiges Ziel darstellt. Auch ein Vergleich der am Prüfstand ermittelten Daten mit Feldmessungen wird erarbeitet.

In den vergangenen Jahren wurden eine grosse Anzahl von Wärmepumpen in einem Feldtest über längere Zeit untersucht (*Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen* FAWA [33]). Obwohl das Hauptprojekt abgeschlossen ist, wurde beschlossen, einige besondere Fragestellungen an einem reduzierten Anlage-Auswahl weiter zu bearbeiten. Das Projekt **QS-WP/QP Qualitätsprüfung von Klein-Wärmepumpen mittels Norm- und Feldtestmessungen, Teilprojekt Langzeitverhalten** [4, 5] untersucht das Langzeitverhalten von Wärmepumpen über mehrere Betriebsjahre auf Veränderungen in der Effizienz, auf das Betriebsverhalten und auf die Unterhaltskosten. So können herstellernerneutrale, breit abgestützte Informationen zusammengetragen werden, die die Akzeptanz der Wärmepumpen unterstützen werden.

In Gebäuden nimmt der Energiebedarf durch die Umsetzung der neuen Erkenntnisse durch die moderne Architektur stetig ab. Allerdings setzen viele Architekten aus designerischen Gründen Glas grossflächig ein. Dort besteht die Gefahr von Überhitzung innerhalb der Gebäude bei intensiver Sonneneinstrahlung oder in den heissen Sommermonaten. Kühlung ist deshalb auch im Gebäudesektor mehr und mehr gefragt. Da auch eine Kältemaschine physikalisch gesehen gegen den 2. Hauptsatz der Thermodynamik ankämpft und somit einen Energiebedarf aufweist, ist es sinnvoll diesen Bedarf wenigstens möglichst optimal bereitzustellen, wenn er durch baulichen Massnahmen nicht von vornherein vermieden werden kann. Im Projekt **SEK – Standardlösungen zum energie-effizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen** [6] werden die technischen Optionen für die Verwendung von Wärmepumpen für Heizen und Kühlen untersucht und daraus die für den praktischen Einsatz bestmöglichen Vari-

anten evaluiert. Besonderes Augenmerk wird auf den Einsatz in MINERGIE und MINERGIE-P-Gebäuden gelegt. Dort müssen die Anforderungen Heizen, Kühlen, Wärmerückgewinnung aus der Abluft und Feuchteregelung durch ein einziges technisches System erfüllt werden. Im Rahmen des IEA-HPP (*Heat Pump Programme* der internationalen Energieagentur) bearbeiten verschiedene Länder die Fragestellung **Economical Heating and Cooling in Low Energy Houses** [7]. Die Koordination dieser Arbeitsgruppe wird vom *Operating Agent* C. Wemhöner, Mitarbeiter des *Instituts für Energie am Bau* der Fachhochschule Nordwestschweiz, geleitet.

Die Schweiz war auch Initiantin des durch 9 Länder bearbeiteten IEA HPP *Annex 28 Test Procedure and Seasonal Performance Calculation of Residential Heat Pumps with Combined Space and Domestic Hot Water Heating* [8], der 2006 abgeschlossen wurde. Wiederum amtierte Herr C. Wemhöner als *Operating Agent*. Der schweizerische Beitrag zu diesem Annex bestand aus dem Projekt **Calculation Method for the Seasonal Performance Factor of Heat Pump Compact Units and Validation** [9], in welchem ausgehend von der jährlichen Aussentemperaturänderung durch eine Gewichtungsmethode der JNG (Jahresnutzungsgrad) für Kompaktwärmepumpen (vgl. das Anlagenschema in Figur 3) berechnet und mit Feldmessungen an zwei Objekten verglichen wurde. Rechnung und Messung zeigten maximale Abweichungen von 5 – 7 %.



Figur 3: Untersuchtes Kompaktgerät mit den Funktionen Heizen, Wärmerückgewinnung, und Brauchwasserbereitung.

Ein zentrales Element der Qualitätssicherung für Wärmepumpen ist die Durchführung von Typenprüfungen, welche nach internationalen Vereinbarungen durchgeführt werden. Der Leiter des Wärmepumpen-Testzentrums an der interstaatliche Fachhochschule in Buchs wurde im Rahmen des Projektes **Vertretung BFE im CEN und Vorsitz CEN TC113/WG10** [10] beauftragt, den Vorsitz der Arbeitsgruppe zu übernehmen, die die bestehende Prüfnorm zur Prüfung von Wärmepumpen

mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Erwärmung von Brauchwasser (EN 255-3) überarbeitet.

Das BFE ist bestrebt, die Emissionen von umweltschädlichen Substanzen zu reduzieren und die Verbreitung von natürlichen Arbeitsmedien zu fördern. Als umweltfreundliche Wärmeträger sind Ammoniak, Kohlendioxyd und Propan bekannt. In der Berichtsperiode wurde das Projekt **Mesure des données énergétiques d'une pompe à chaleur air/eau au CO₂ (R744) pour préparation d'eau chaude sanitaire dans un hôpital** [11] abgeschlossen, das über den Einbau einer Trinkwasser-Wärmepumpe im Spital Le Locle und die Ausmessung der Anlage berichtet. Es zeigte sich einmal mehr, dass eine CO₂-Wärmepumpe umso bessere Wirkungsgrade aufweist, je kälter das Kaltwasser der Wärmepumpe zugeführt werden kann. Beträgt die Zulufttemperatur des Kaltwassers weniger als 15 [°C] kann für eine Heisswassertemperatur von 75 [°C] und einer Aussenlufttemperatur von 0 [°C] ein COP von 3.2 erreicht werden. Im Gesundheitswesen (Figur 4) und im Tourismus besteht eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten für grössere und mittlere Anlagen zur Heisswasser-Bereitung. Seitens der Industrie kann erfreulicherweise eine Zunahme des Angebotes entsprechender Anlagen verzeichnet werden.



Figur 4: CO₂-Wärmepumpe zur Trinkwasserbereitung auf dem Dach des Spitals von Le Locle.

Die Problematik der umweltfreundlichen Wärmeträger wird eliminiert, wenn anstatt des üblichen thermodynamischen Kreisprozesses mit einem fluiden Wärmeträger ein magnetokalorischer Kreisprozess gewählt wird. Hier kann durch Wärmezufuhr und Abfuhr und durch Anlegen und Entfernen von Magnetfeldern an gewisse Materialien ebenfalls eine Wärmepumpe oder eine Kältemaschine realisiert werden. Das Grundprinzip wurde durch Emil Warburg schon 1881 entdeckt, zum technischen Durchbruch mangelte es aber an den geeigneten magneto-kalorischen Materialien. Erst in neuerer Zeit wurden neue Materialpaarungen gefunden, die zu einer Renaissance der Anwendung für Wärmepumpen und Kältemaschinen

führten. Das BFE hat diese Entwicklung durch die Unterstützung von 2 Projekten beschleunigt. Das Projekt **Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz** [12] untersuchte die beiden wichtigsten Anwendungsfälle für Wärmepumpen in der Schweiz, den Fall *Fussbodenheizung mit Erdsonde* und den Fall *Ersatz bestehender, auf fossilen Brennstoffen beruhender Heizsysteme*. Es zeigte sich, dass sowohl beim Fall *Ersatzheizung* wie auch beim Fall *Fussbodenheizung* das magnetokalorische Prinzip nur in mehrstufiger Ausführung den notwendigen Temperaturhub überwinden kann. Dabei benötigt der Fall *Ersatzheizung* eine Stufenanzahl, die nicht mehr wirtschaftlich einsetzbar ist. Beim Fall *Fussbodenheizung* besteht jedoch eine Chance, das magnetokalorische Prinzip auch wirtschaftlich einsetzen zu können, weshalb in einer nächsten Projektphase ein konkreter Prototyp gebaut und untersucht werden soll. Im Projekt **Démonstrateur magnétique** [13] unterstützte das BFE die Entwicklung und den Bau eines zweiten Prototypen einer magnetokalorischen Kältemaschine, die auch auf der Weltausstellung in Hannover ausgestellt wurde (Figur 5). Der Prototyp kann einstufig eine Temperaturänderung im Gadolinium von 1.6 bis 2.1 [°C] erreichen, was natürlich erst bei mehrstufigen Einsatzfällen einen technisch interessierenden Betrieb ermöglicht.



Figur 5: Prototyp einer magnetokalorischen Kältemaschine, welcher auf der Weltausstellung in Hannover ausgestellt wurde.

Wärmepumpen nutzen Niedertemperatur-Energie und heben diese auf ein nutzbares Temperaturniveau. Die zugeführte Energie stammt dabei aus Erdsonden, Abwasser, Oberflächengewässern oder aus der Umgebungsluft. Das Wärmequellenmedium wird um einige wenige Grade abgekühlt, und die extrahierte Wärme wird durch die Wärmepumpe das zu beheizende Objekt übergeben. Luft/Wasser-Wärmepumpen sind sehr verbreitet, da sie einfach und kostengünstig realisiert werden können. Sie haben aber den Nachteil eines

geringeren Wirkungsgrades, da die Temperatur der Umgebungsluft häufig tiefer liegt als diejenige der anderen genannten Wärmequellen. Zudem kann der Luftabkühlungs-Wärmetauscher wegen der in der Luft enthaltenen Feuchte beschlagen oder vereisen, was den Wärmedurchgangs-Vorgang stark erschwert. Diese Wärmetauscher müssen dann mittels zusätzlich zugeführter Energie durch Abtauen vom Eis befreit werden. Das BFE hat schon mehrere Projekte zur Optimierung des Abtau-Vorganges unterstützt [16]. Zur Illustration und Verbreitung der letzten Ergebnisse wurde eine **Lern-CD Optimierung des Abtau-Vorganges** angefertigt [17], die einen optimalen, energiesparenden Abtau-Betrieb visuell gut verständlich zeigt und erklärt. Das Projekt **LOREF 2 Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung** [14] untersucht die am Luftkühler relevanten Wärme- und Stofftransport-Mechanismen und die dadurch entstehenden Optimierungsmöglichkeiten. Im Projekt wurden 7 Versuchsluftkühler experimentell ausgemessen und mit einem Rechenmodell verglichen. Figur 6 zeigt einen Überblick über die Versuchsanlage. Obwohl die Unterschiede in den verschiedenen Geometrien zu relativ kleinen Leistungsunterschieden führten, konnte doch einiges Verbesserungspotential im Bereich Ventilator konstruktion und im Betriebsverhalten gefunden werden. Das Projekt soll mit dem Vergleich einer marktüblichen konventionellen Luft/Wasser-Wärmepumpe und einer durch das Forscherteam optimierten Luft/Wasser-Wärmepumpe im Jahr 2007 abgeschlossen werden. Im Laufe der ganzen Projektzeit hat es sich gezeigt, dass die Verbesserungsmöglichkeiten systematisch gesucht werden müssen. Der wissenschaftliche Ansatz liegt in der Analyse und dem Suchen der exergetischen Verluste. Exergie ist das Vermögen eines thermodynamischen Zustandes, aus einer Zustandsänderung auf einen Umgebungszustand verlustfrei Arbeit zu leisten. Alle realen Effekte wie Reibung oder Temperaturabfall führen zu einer Verminderung dieser Arbeitsleistungsfähigkeit. Im Projekt **WEXA: Exergie-Analyse im Dienste der Verbesserung von Luft/Wasser-Wärmepumpen** [15] wurde das Projektteam damit beauftragt, die Exergieverluste an einer Luft/Wasser-Wärmepumpe systematisch zu suchen. Die grössten Verluste entstehen im Kompressor und im Verdampfer und sind bei drehzahlkonstantem Betrieb auch abhängig vom Temperaturhub und von der Wärmepumpenleistung. Es zeigt sich klar, dass ein drehzahl geregelter Betrieb von Kompressor und von Ventilator vorteilhaft ist, da bei kleinerem Leistungsbedarf die notwendigen Temperaturgefälle in den Wärmetauschern auch kleiner werden und dadurch auch die Exergieverluste abnehmen. Bei Luft/Wasser-Wärmepumpen ist wegen der in der Umgebungsluft enthaltenen Feuchte periodisch eine Abtauung notwendig.



Figur 6: Versuchsanlage der HTA Luzern zur Untersuchung der Bereifungs- und Vereisungsproblematik an luftgekühlten Wärmetauschern.

In der Schweiz konnte im Berichtsjahr die 100'000-te Wärmepumpe in Betrieb genommen werden. Vor allem in kleineren Gebäuden wie Ein- und Zweifamilien-Häusern hat sich die Wärmepumpe grossflächig durchgesetzt. Energetisch interessant sind aber auch die grösseren Einheiten zur Beheizung und zur Warmwasserbereitung in grösseren Mehrfamilienhäusern oder innerhalb von Siedlungen mit mehreren Gebäuden. Die Entwicklung, in diesen Fällen vermehrt Wärmepumpen einzusetzen, wird auch durch die Zunahme der Contracting-Aktivitäten gefördert. Erste Untersuchungen, die vor wenigen Jahren gestartet wurden und nun mit dem Projekt **Grosswärmepumpen: Energetische und planerische Analyse von 10 Anlagen – Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte** [18] abgeschlossen wurden, zeigen, dass die Leistungszahlen von Grosswärmepumpen durchwegs kleiner waren als die Leistungszahlen von kleineren Serienprodukten. Erste Analysen erklären diese unerfreuliche Tatsache damit, dass die kleineren Wärmepumpen als Serienmodelle auch schon eine Optimierung erfahren haben, während die Grosswärmepumpen jeweils speziell auf den vorliegenden Fall ausgelegt werden müssen. Ebenfalls kann als Erklärung für die kleineren Leistungszahlen angeführt werden, dass die Verteilung der produzierten Wärme an die dezentralen Verbraucher und die Anzapfung der meist zentralen Wärmequelle zusätzliche Übertragungs-Verluste generieren. Diese können erheblich sein, wenn hier falsche Konzepte umgesetzt werden. Im Folgeprojekt **Grosswärmepumpen 2** [19] sollen die bisher untersuchten Anlagen auf die bestgeeignetsten Konzepte durchleuchtet und auch kostenrelevante Kennzahlen den Planern und Anlagenbauern zur Verfügung gestellt werden. Dabei geht es vor allem um die Frage der dezentralen oder der zentralen Bereitstellung von Warmwasser und um die optimale Anzapfung der Umgebungsenergie.

Auch hier zeigt sich wieder einmal die Niederwertigkeit der Umgebungswärme. Sie ist zwar gratis und überall vorhanden; will man jedoch an einer örtlich beschränkten Stelle eine grosse Leistung anzapfen, werden die notwendigen Temperaturgefälle umso grösser, je grösser die gewünschte Leistung ist und das Vorhaben erzeugt umso mehr Exergieverluste. Die Wärmequellen-Nutzung ist umso optimaler je dezentraler sie erfolgt. Dieser Zusammenhang muss insbesondere bei der Konzipierung von Grosswärmepumpen sorgfältig ins Realisierungs-Konzept eingearbeitet werden.

Wärmepumpen benötigen von aussen zugeführte Antriebsenergie. Bisher befinden sich vor allem elektrisch angetriebene Wärmepumpen im Markt. Der Antrieb kann aber auch verbrennungsmotorisch erfolgen oder der Wärmepumpeneffekt wird mittels einer Absorptionswärmepumpe erzeugt. Diese alternativen Antriebskonzepte werden durch die Gasindustrie gefördert. Das BFE möchte auch in diesem Einsatzfall energetisch hochwertige Lösungen und einen zuverlässigen und störungsfreien Betrieb erreichen und versucht, auch die Prüfverfahren für beide Antriebskonzepte gleichwertig zu gestalten. Dafür wurden die Projekte **Gaswärmepumpen – Feldforschung mit Effizienz- und Praxistest** [20] und **Qualitätssicherung von Gaswärmepumpen** [21] unterstützt. Leider sind beiden Projekten aufgrund von Personal-Fluktuationen um ein Jahr verspätet.

WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG

Mit dezentralen Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen könnte unter der Randbedingung des gleichen Verbrauchs der bisher umgesetzten fossilen Brennstoffe ein wesentlicher zusätzlicher Anteil an elektrischer Energie bereitgestellt werden. Damit die WKK-Anlagen aber betriebssicher und wirtschaftlich sind, sollte ihr Leistungsbereich mehrere Hundert Kilowatt elektrische Energie betragen. Die Abwärme sollte in der unmittelbaren Umgebung verwertbar sein. Im Kernbereich der WKK-Anlagen sind im Berichtsjahr keine Forschungsarbeiten unterstützt worden. Die Aktivitäten konzentrierten sich auf die schadstoffarme Verbrennung, die vom Programm Verbrennung unterstützt wird.

Das Bestreben, Niedertemperaturwärme in Arbeit bzw. elektrische Energie umzuwandeln, wird seit geraumer Zeit durch unterschiedliche apparative Konzepte bearbeitet. Ein neuer Vorschlag besteht in der Umkehr des Betriebes eines sogenannten *Scroll-Verdichters*. Ein Wärmeträger soll durch eine Abwärmenutzung verdampft werden, und expandiert danach in einer *Scroll-Turbine*. Diese Idee wird im Projekt **Nouveau système de cogénération à turbine spirale haute température** [22] verfolgt. Das Projekt startete im Berichtsjahr

und die Projektgruppe ist im Stadium der Konstruktion und des Aufbaus der Versuchseinrichtungen.

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. 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 Haushaltskälte, die allerdings einen grossen Markt darstellt, werden Seriengeräte eingesetzt.

Das Projekt **Verdoppelung der Jahresarbeitszahl von Klimakälteanlagen durch Ausnutzung eines kleinen Temperaturhubes** [23] wurde 2006 abgeschlossen. In vielen Anwendungsfällen würde ein Temperaturhub in Klimakälteanlagen von 10 bis 20 [°C] genügen. Häufig wird aber ein Standard-Hub von 30 – 60 [°C] gebaut, da dann auch die Raumregulierung weniger diffizil konzipiert werden muss. Klimakälteanlagen erweisen sich in solchen Fällen als eigentliche Exergie-Vernichtungsanlagen. An zwei ausgemessenen Anlagen konnte gezeigt werden, dass die Effizienz der Kälteanlage durch die Verkleinerung des Temperaturhubes markant erhöht werden kann. Im besseren System erreicht der COP bei einem Hub von unter 15 [°C] beinahe 11. Trotzdem wird auch hier etwa 50 % der Kompressorleistung zur Deckung der äusseren Exergieverluste benötigt.

Das Projekt **Wärmerückgewinnung (WRG) in der gewerblichen Kälte** [24] untersucht den energetischen Nutzen einer Wärmerückgewinnung 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 längerer Zeit im Jahr ein paralleler Kälte- und Wärmebedarf besteht, könnte die gesamte Energiebilanz verbessert werden. Der Sachverhalt soll nun an zwei konkreten Anlagen (Migros und Coop) messtechnisch aufgezeigt und danach an die Branche kommuniziert werden. Man hat beschlossen, das Messprojekt über einen ganzen Jahreszyklus laufen zu lassen.

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 Übernahme von erheblichen finanziellen Beiträgen. Da die Projektleiter häufig an einer Fachhochschule tätig sind, besteht eine besonders intensive Beziehung zwischen den Projektpartnern. Die Projekt-Themen wirken sich dabei auch auf den Unterricht aus, denn häufig können innerhalb der unterstützten Projekte auch Semester- und Diplomarbeiten integriert werden. Viele Institute an den Fachhochschulen bilden eigentliche Kompetenzzentren, innerhalb von welchen sehr effizient gearbeitet werden kann. An Zusammenarbeiten sind auch das *Laboratoire d'énergie industrielle* (LENI) der EPFL und das *Institut für Mess- und Regeltechnik* (IMRT) der ETHZ beteiligt.

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 <http://www.energieforschung.ch/energieforschung/suche/index.html?lang=de> orientiert. An Workshops über abgeschlossene Forschungsprojekte werden ausgewählte Personen aus Industrie und Markt orientiert. An der 13. UAW-Tagung **Potentiale von Gross-Wärmepumpen besser nutzen - Konzeption, Anwendungen, Kundensicht** [25] wurden im grössten Hörsaal der FHI Burgdorf die Einsatzmöglichkeiten und Detailinformationen zur Konzipierung von Grosswärmepumpen vorgestellt und diskutiert.

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 Erd-*

ölvereinigung 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 diskutiert und gestartet. Die Zusammenarbeit mit dem neuen Forschungsfonds *swiss-electric-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** [22] 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** [26] darstellt.

Es wurde mit Genugtuung zur Kenntnis genommen, dass der *Stromsparfonds der Stadt Zürich* und das *Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel Stadt* sich durch namhafte Beiträge am BFE-Projekt **Verdoppelung der Jahresarbeitszahl von Klimakälteanlagen durch Ausnutzung eines kleinen Temperaturhubes** [23] beteiligten.

Mit den Branchenverbänden besteht ein institutionalisierter Informationsfluss, denn alle wesentlichen Verbände haben ein Mitglied in der Begleitgruppe unseres Programms. Im Moment wird die Begleitgruppe um ein Mitglied aus dem Bereich Planung erweitert. 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 2006 vorwiegend durch eine aktive Mitarbeit im *Heat Pump Programme* (HPP) der Internationalen Energieagentur IEA. Diese aktive Rolle wird durch den von der Schweiz initiierten und Ende 2005 abgeschlossenen Annex 28 [27] und den im Berichtsjahr gestarteten Annex 32 [7] unterstrichen, in dem in beiden Projekten die FHNW MuttENZ den *Operating Agent* stellte. Im neuen Annex 32 beteiligen sich neben der Schweiz die Länder Österreich, Kanada, Deutschland, Japan, Niederlande, Norwegen, Schweden und die USA.

Wie im Annex 28 ist es gelungen, das Interesse dieser 9 Länder auf ein gemeinsames Forschungsthema zu konzentrieren. Das IEA-HPP ist auch zuständig für die Organisation der im dreijährigen Turnus stattfindenden **Heat Pump Conference**. Die letzte Konferenz fand 2005 in Las Vegas statt. Die nächste Konferenz findet vom 20. – 22. Mai 2008 in Zürich statt und wird von den Delegierten der Schweiz vorbereitet. Das *1st announcement* und die Konferenz-Webseite wurden Anfangs 2007 publiziert (www.hpc2008.org).

In den wichtigen europäischen Normengremien vertritt die Schweiz ihre Anliegen. Die 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 unter Leitung der Gruppe GRETh (*Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques*) in Grenoble keine schweizer Forschungsgruppe beteiligt ist, besteht doch ein regelmässiger Gedankenaustausch mit

gegenseitigen Besuchen mit dem Projektleiter Dr. Bernard Thonon. Die schweizerischen Aktivitäten im Bereich Ammoniak und CO₂ fanden grosse Beachtung.

Die Internetseite des Forschungsprogramms www.waermepumpe.ch [35] findet mit über 90 % der Zugriffe aus dem Ausland auch international grosse Beachtung.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

In der Gemeinde Bremgarten (BE) besteht ein Wärmekollektiv, das seit 1984 mit Wärme aus dem gereinigten Abwasser der Kläranlage für die Wärmepumpen versorgt wird. Die Auslegeleistung der Wärmeentnahme für die Wärmepumpen beträgt 1400 kW. Diese Anlage wurde ohne Finanzhilfe des Bundes erbaut und stellte damals eine Pionierleistung dar. Sie betrat technologisch Neuland, weshalb noch wenige Erfahrungen vorlagen. Ursprünglich wurde die Wasserversorgung als offenes System betrieben. Wegen diverser betrieblicher Probleme wurde die Anlage im Jahre 2005 mit finanzieller Unterstützung durch das Bundesamt für Energie (**Erfolgskontrolle Wärmekollektiv Bremgarten – Sanierung und Erweiterung** [27]) auf ein geschlossenes System umgebaut. Die Sanierung umfasst auch den teilweisen Ersatz der bestehenden Wärmepumpen. Betrieblich kann der Umbau als Erfolg gewertet werden. In energetischer Hinsicht sind noch Optimierungen möglich. Derzeit sind noch nicht alle vorgesehenen Wärmebezüger angeschlossen. Man rechnet damit, bei Vollobau eine Jahresarbeitszahl von ca. 3.0 zu erreichen. Die angeschlossenen Wärmepumpen erreichen im Mittel einen COP von ca. 3.2. Der Umbau des Kaltwärmenetzes kostete etwa 1.8 Mio. Franken oder 1290 Fr/kW_{Abwasser}. Die Wärmekosten werden auf 13.4 Rp/kWh beziffert. Die Zahlen beziehen sich auf den Vollobau.

In der Gemeinde Oberwald (VS) wurde ab 1990 mit Unterstützung des Bundesamts für Energie ein Leitungssystem zur Verteilung von Tunnelwasser aus dem Furkatunnel für die Nutzung als Wärmequelle für Wärmepumpen geschaffen (**Sanierung und Optimierung der Wärmepumpenanlage mit Gebirgswasser im Haus Kristall in Oberwald** [28]). Dank geschickter Koordination konnten die Tunnelwasserleitungen gleichzeitig mit der Sanierung des Trinkwasser- und Meteorwasseretzes im gleichen Graben erstellt werden. Derzeit sind 16 Wohngebäude mit 171 Wohnungen und Freizeiteinrichtungen angeschlossen (Figur 7). Die installierte Heizleistung beträgt 985 kW. Das Tunnelwasser fliesst ganzjährig mit konstant 97 Liter pro Sekunde und eine Temperatur von 16 °C. Dank des natürlichen Gefälles zwischen Tunnel und Wohnort sind keine Pumpen zur Förde-

lung des Tunnelwassers nötig. Stellvertretend für die ganze Anlage wurde die Wärmepumpenanlage des Hauses Kristall für eine eingehende Erhebung der Betriebserfahrungen und der Energiekennwerte ausgewählt. Das Projekt wurde durch einen Schaden an der Wärmepumpe, dessen Ursachen nicht eindeutig abgeklärt werden konnten, für längere Zeit unterbrochen. Grund für die lange Verzögerung waren Rechtsstreitigkeiten über die Schadensdeckung (die zusätzlichen Stromkosten für die überbrückende Widerstandsheizung dürften höher als der eigentliche Schaden gewesen sein!). Nach der Reparatur der Wärmepumpe und deren Wiederinbetriebnahme stellten sich die erwarteten Betriebseigenschaften ein. Die Nutzung des Tunnelwassers ist bislang unproblematisch (auch bei den anderen angeschlossenen Liegenschaften) und erbringt gute Jahresarbeitszahlen. Diese betragen für die Messperiode 2006 4.02. Die variablen Wärmegestehungskosten (variable Kosten) liegen unter 5 Rp/kWh (Strompreis 13.5 Rp/kWh, Wasserpreis 0.15 Rp/m³). Das Tunnelwasser wird dem Verdampfer der Wärmepumpe ohne Zwischenkreis zugeführt. Es ist ein Filter für 800 Mikrometer Korngrösse eingebaut. Dieser muss alle 14 Tage gespült werden. Die Wärmepumpe arbeitet auf einen Wärmespeicher, der ganzjährig auf 54 °C gehalten wird. Dies wäre in Anbetracht der vorhandenen Bodenheizung nicht nötig. Eine Änderung der Steuerung in Hinblick auf variable, d.h. von der Umgebungstemperatur abhängige Speichertemperaturen würde die Jahresarbeitszahl nochmals verbessern.



Figur 7: Haus Kristall in Oberwald, das mit einer Wärmepumpe mit Abwasserwärme aus dem Furka-Tunnel beheizt wird.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Im Jahr 2006 wurden wiederum die im CORE-Konzept aufgelisteten Ziele beharrlich verfolgt. Zudem 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. Sehr interessant ist die konsequente Eruiierung der Exergieverluste und die Suche nach Umsetzungen mit kleineren Verlusten. Im Berichtsjahr waren leider die Ende 2004 erfolgten Budgetkürzungen immer noch spürbar. Mehrere interessante Projektvorschläge konnten mangels Finanzierung nicht begonnen werden. Wir hoffen ganz klar auf eine spürbare Verbesserung in den kommenden Jahren. Die Wärmepumpen-Industrie erfreut sich über einer grossen Nachfrage aus dem Markt. Diese angenehme Situation führt allerdings dazu, dass viele Firmen mit der Umsetzung 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. Anfangs 2007 konnten wiederum mehrere Forschungsprojekte bewilligt werden, über die unter anderem auch an der UAW-Tagung 2007 berichtet werden wird. Die Programmleitung ist überzeugt, dass die Erfolgsstory und die Weiter-

verbreitung 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.

Mit den Schlussberichten zu den beiden P+D-Projekten endet das Programm P+D/UAW. Das Programm P+D bildete das Bindeglied zwischen der Forschung (F&E) einerseits und dem Markt andererseits. Mit diesem Programm war es möglich, interessanten Ideen im Feld zum Durchbruch zu verhelfen (Pilotanlagen) und erfolgreiche Pilotanlagen einem weiteren Publikum bekannt zu machen und zur Nachahmung zu empfehlen (Demonstrationsanlagen). Das Programm P+D war gerade für die im Allgemeinen klein strukturierte Wärmepumpenbranche der Schweiz eine grundlegende Unterstützung, um neue Ideen überhaupt realisieren und finanziell verkraften zu können. Dieses Programm hat die Umsetzung von Forschungsergebnissen massgeblich unterstützt wenn nicht erst möglich gemacht.

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

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 vorhanden, siehe unter www.waermepumpe.ch.

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter den angegebenen Publikationsnummern in Klammern) oder www.waermepumpe.ch.

Unter den angegebenen Internet-Adressen sind weitere Informationen verfügbar.

- [1] H.R.Gabathuler, H.Mayer, Th.Baumgartner, (gabathuler.ag@bluewin.ch), Gabathuler AG, Diessenhofen: **Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe** (JB)
- [2] P.Hubacher, M.Ehrbar, (he-ko@bluewin.ch), Hubacher Engineering, Engelburg: **Witterungsgesteuerter Ladekreis** (JB)
- [3] M.Nani, P.Hubacher, (marco.nani@ntb.ch), Wärmepumpen-Testzentrum WPZ, Buchs: **QS-WP/QP Qualitätsprüfung von Klein-Wärmepumpen mittels Norm- und Feldmessungen, Teilprojekt Effizienzsteigerung (Bestanlagen)** (JB)
- [4] P.Hubacher, (he-ko@bluewin.ch), Hubacher Engineering, Engelburg: **QS-WP/QP Erfüllung der mit den Anlagenbesitzern eingegangenen Verpflichtungen im Rahmen der Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen (FAWA) bis und mit Abschluss des Projektes** (JB)
- [5] M.Nani, P.Hubacher, (marco.nani@ntb.ch), Wärmepumpen-Testzentrum WPZ, Buchs: **QS-QP/QP Qualitätsprüfung von Klein-Wärmepumpen mittels Norm- und Feldmessungen, Teilprojekt Langzeitverhalten** (JB)
- [6] C.Wemhöner, Th.Afjei, (thomas.afjei@fhnw.ch), Institut für Energie am Bau, Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz: **SEK – Standardlösungen zum energie-effizienten Heizen und Kühlen** (JB)
- [7] C.Wemhöner, Th.Afjei, (thomas.afjei@fhnw.ch), Institut für Energie am Bau, Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz: **Operating Agent IEA HPP Annex 32, Economical Heating and Cooling in Low Energy Houses** (JB)
- [8] IEA HPP Heat Pump Programm, (www.heatpumpcentre.org), Heat Pump Centre, Borås Schweden: **Annex 28: Test Procedure and Seasonal Performance Calculation of Residential Heat Pumps with Combined Space and Domestic Hot Water Heating** (kann als Schlussbericht vom Heat Pump Centre bezogen werden)
- [9] C.Wemhöner, R.Dott, Th.Afjei, H.Huber, D.Helfenfinger, P.Keller, R.Furter, (thomas.afjei@fhnw.ch), Institut für Energie am Bau, Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz und Hochschule für Technik Luzern, Horw: **Calculation Method for the Seasonal Performance Factor of Heat Pump Compact Units and Validation** (SB) (230227)
- [10] M.Nani, (marco.nani@ntb.ch), Wärmepumpen-Testzentrum, Interstaatliche Fachhochschule Buchs NTB, Buchs: **Vertretung BFE im CEN TC113 und Vorsitz WG10** (JB)

- [11] P.Anstett, (www.pac-co2.ch), pac-co2.ch Recherche et développement, Neuchâtel: **Mesure des données énergétiques d'une pompe à chaleur air/eau au CO2 (R744) pour préparation d'eau chaude sanitaire dans un hôpital** (SB) (260056)
- [12] P. Egolf, F.Genre, A.Kitanovski, O.Sari, (peter.egolf@heig-vd.ch), Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion, Yverdon-les-Bains: **Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz** (SB) (260062)
- [13] O.Sari, P.Egolf, N.Alber, N.Erbeau, (osmann.sari@heig-vd.ch), Communauté de recherche Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion et AIT/CeTT/Institut de Génie Thermique, Yverdon-les-Bains: **Démonstrateur magnétique** (SB) (260063)
- [14] K.Hilfiker, L.Berlinger, M.Imholz, R.Sahinagic, L.Gasser, B.Wellig, (beat.wellig@hta.fhn.ch), Hochschule für Technik und Architektur Luzern HTA, Horw: **LOREF 2 Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung** (JB)
- [15] K.Hilfiker, L.Gasser, B.Wellig, (beat.wellig@hta.fhn.ch), Hochschule für Technik und Architektur HTA, Horw: **WEXA: Exergie-Analyse im Dienste der Verbesserung von Luft/Wasser-Wärmepumpen** (JB)
- [16] M.Ehrbar, S.Bertsch, S.Schwendener, P.Hubacher, C.Bernal, B.Hubacher, (ehrbar.max@bluewin.ch) Arbeitsgemeinschaft Interstaatliche Hochschule für Technik NTB und Hubacher Engineering AG, Buchs und Engelburg: **Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern - Phase 3: technische Umsetzung, Labor- und Feldversuche** (SB) (250092)
- [17] P.Hubacher, M.Ehrbar, (he.ko@bluewin.ch) Hubacher Engineering AG, Engelburg: **CD zum Projekt Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern - Phase 3: technische Umsetzung, Labor- und Feldversuche** (kann beim Projektleiter bezogen werden)
- [18] 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) (260032)
- [19] P.Hubacher, M.Ehrbar, (he.ko@bluewin.ch) Hubacher Engineering AG und Enertec AG, Engelburg und Sargans: **Grosswärmepumpen 2** (JB)
- [20] M.Seiffert, (m.seiffert@svgw.ch) SVGW Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Schwerzenbach: **Gaswärmepumpen – Feldforschung mit Effizienz und Praxistest** (auf Ende 2007 verschoben)
- [21] M.Seiffert, (m.seiffert@svgw.ch) SVGW Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Schwerzenbach: **Qualitätssicherung von Gaswärmepumpen** (auf Ende 2007 verschoben)
- [22] M.Kane, D.Cretegny, D.Favrat, (malick.kane@eneftech.com) ENEFTECH Innovation SA und Laboratoire d'énergétique industrielle LENI-EPFL, Lausanne: **Nouveau système de cogénération à turbine spirale haute température** (JB)
- [23] B.Wellig, B.Kegel, M.Meier, (beat.kegel@ebp.ch) Ernst Basler + Partner AG, Zürich: **Verdoppelung der Jahresarbeitszahl von Klimakälteanlagen durch Ausnutzung eines kleinen Temperaturhubes** (SB) (260008)
- [24] S.Gutzwiller, M.Erb, (stephan.gutzwiller@eicher-pauli.ch) Dr.Eicher+Pauli AG, Liestal: **Wärmerückgewinnung (WRG) in der gewerblichen Kälte** (JB)
- [25] M.Ehrbar, F.Rognon, (fabrice.rognon@bfe.admin.ch) Bundesamt für Energie, Bern: **Potenziale von Gross-Wärmepumpen besser nutzen Konzeption, Anwendungen, Kundensicht; 13. Tagungsband des Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte des Bundesamtes für Energie (BFE)** (SB) (260044)
- [26] O.Wanner, (oskar.wanner@eawag.ch) EAWAG aquatic research, Dübendorf: **Wärmerückgewinnung aus Abwasser** (SB) (240104)

Liste der P+D-Projekte

- [27] B. Eggen, J. Zwiack, (bernhard.eggen@eicher-pauli.ch), Dr.Eicher+Pauli, Zinggstrasse 1, 3007 Bern: **Erfolgskontrolle Wärmekollektiv Bremgarten – Sanierung und Erweiterung** (prov. Schlussbericht, wird nicht publiziert).
- [28] H. Kronig, (kronig.hik@rhone.ch), Hochschule Westschweiz, Standort Sion: **Sanierung und Optimierung der Wärmepumpenanlage mit Gebirgswasser im Haus Kristall in Oberwald** (SB) (260045)

Referenzen

- [29] Bundesamt für Energie 2005: **Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2005**, aus BFE, 2005.
- [30] F. Rognon: **Energetische Potenziale von Wärmepumpen kombiniert mit Wärme-Kraft-Kopplung** Für maximale CO2-Reduktion und für fossile Stromerzeugung mit CO2-Reduktion in der Schweiz, Schlussbericht BFE, 2005 (250044_d, 250044_f, 250044_e)
- [31] CORE 2004: **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004-2007**, aus BFE, 01.01.2004 (240007).
- [32] Th.Afjei, H.R.Gabathuler, H.Mayer: **Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen**, Schlussbericht BFE 2002 (220216)
- [33] Internetseite des Forschungsprogramms: www.waermepumpe.ch/fe Rubrik Berichte: download von Zusammenfassungen, Jahresberichten und ausführlichen Schlussberichten durchgeführtter Forschungsarbeiten

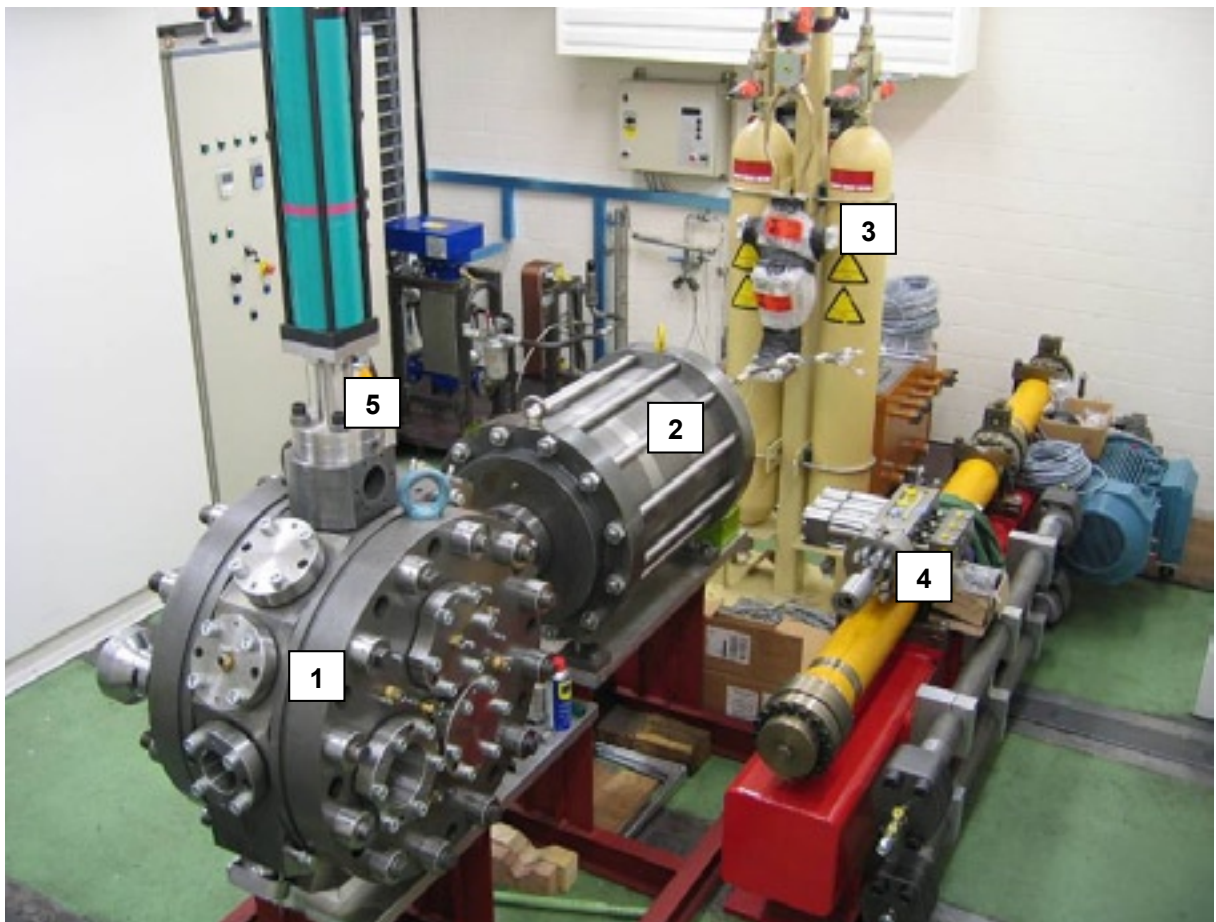
Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN

Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Stephan Renz

renz.btr@swissonline.ch



Versuchsstand für Verbrennungssystem grosser 2-Takt Schiffsdieselmotoren

Für das durch die EU geförderte Projekt **HERKULES** [3] wurde bei Wärtsilä Schweiz in Oberwinterthur ein Versuchsstand entwickelt. (1) Versuchsträger als Brennraum grosser 2-Takt Dieselmotoren; (2) Verbrennungsluftvorwärmung; (3) Druckluftflaschen für die komprimierte Verbrennungsluft; (4) Einspritzsystem für Drücke bis 1200 bar; (5) Auslassventil.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Nutzung der fossilen Energieträger Heizöl und Erdgas durch Verbrennung hat unsere Energieversorgung in der Vergangenheit dominiert und wird auch in Zukunft massgebend bleiben. Die Anforderungen an einen möglichst hohen Wirkungsgrad bei minimalem Schadstoffausstoss (Ziel: Null-Emissions-System) werden durch die Vorgaben der Ressourcenknappheit sowie der Umwelt- und Gesundheitsschäden immer höher gesteckt. Die gestiegenen Energiepreise verstärken den Druck und bieten auch marktwirtschaftliche Chancen für erneuerbare Brennstoffe.

Um die Anforderungen zu erfüllen 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 genügt bei weitem nicht. Wichtige Instrumente sind computergestützte Berechnungsmodelle (Modellierung), optische Messverfahren (Laserspektroskopie) sowie geeignete Versuchsträger, um die theoretischen Ergebnisse zu überprüfen oder die erforderlichen Kennzahlen zu liefern. Um im weltweiten Forschungsumfeld einen Beitrag leisten zu können, ist eine Konzentration und Kontinuität in ausgewählten Themen erforderlich. Indem beispielsweise seit Jahren Institute und Labors aus dem ETH-Bereich mit Industriepartnern zusammenwirken, wurde ein international anerkannter Stand erreicht.

Damit Fortschritte erzielt werden können, muss in der Verbrennungsforschung auf zwei Ebenen gearbeitet werden. Als Basis müssen geeignete Berechnungsmodelle, Messverfahren und Versuchsträger entwickelt oder verfeinert werden, um überhaupt die komplexen Vorgänge im Verbrennungsprozess von der Brennstoffzufuhr, der Gemischbildung, der Verbrennung bis zur Rauchgasentstehung zu erfassen oder zu simulieren. Laserdiagnostik, Modellierung wie Rechencodes für die Large Eddy Simulation in der turbulenten Verbrennung oder Versuchsträger wie eine Hochdruck- Hochtemperatur-Zelle, ein Einhubtriebwerk oder ein Versuchszylinder für Schiffsdieselmotoren, der für das EU-Forschungsprojekt *Herkules* entwickelt wird, sind Schwerpunkte. Mit diesen Instrumenten werden auf einer zweiten Forschungsebene gezielt Veränderungen am Verbrennungssystem vorgenommen, um den Verbrennungsprozess zu verbessern, damit die erwünschten Wirkungen wie Schadstoffreduktion und Wirkungsgraderhöhung erreicht werden. Die Fokussierung des Programms Verbrennung und Feuerung richtet sich nach den Vorgaben des **Konzeptes der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007** [10].

Einige bisher unter dem Programm Feuerung und Verbrennung geführte Projekte wurden ins neu gestartete Forschungsprogramm Kraftwerk 2020 übertragen. Dazu gehören vor allem gasturbinenrelevante Arbeiten.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

ENTWICKLUNG NUMERISCHE SIMULATION, MESSMETHODEN UND VERSUCHSTRÄGER

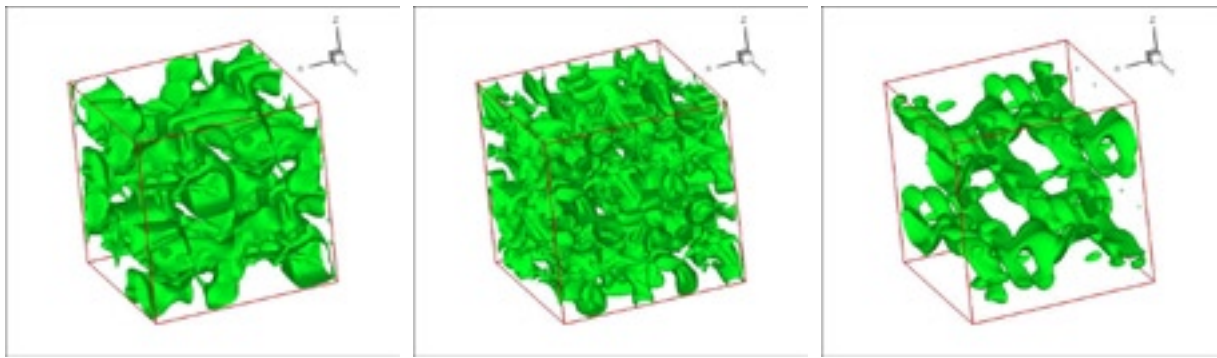
Das Ziel des Projektes ***Lattice Boltzmann Simulationsmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich*** [1] ist die Entwicklung von neuen effizienten Berechnungsmodellen und -programmen für komplexe physikalische und chemische Prozesse in instabilen Strömungen. Die rechnergestützte Berechnung und Darstellung der Strömungsdynamik erfolgt im Mikrometerskalenbereich. Die erforderliche Annäherung basiert auf den sogenannten Boltzmann Gitter-Modellen (*Lattice Boltzmann Method*) der Boltzmann kinetischen Gleichung. Sowohl die thermischen, als auch die isothermischen Modelle werden dargestellt. Im Projekt wurden bisher die folgenden Ergebnisse erreicht:

- Das Modell für Mehrkomponenten Strömungen wurde entwickelt, implementiert und getestet.
- Ein rechnerisch effizientes drei-dimensionales Modell für isotherme Strömungen wurde ent-

wickelt und das dazugehörige effiziente Computerprogramm wurde an mehreren *benchmark* Problemen getestet. Dieses Modell zeigt numerische Stabilität und ist deshalb sehr wichtig für höhere Reynolds- Simulationszahlen. Durch spezielle Modifikationen (zum Beispiel Outflow Randbedingungen) ist es gelungen, effiziente Simulationen in Angriff zu nehmen.

- Ein drei-dimensionales thermisches Modell wurde weiter entwickelt und für einige *benchmark* Strömungen getestet (Fig. 1).
- Die Reduzierung von Variablen in Reaktionsmodellen wurde entwickelt und getestet.
- Eine alternative Beschreibung von Strömungen mit kleinerer *Mach*-Zahl wurde hergeleitet und numerisch getestet.

Die theoretischen Fragen sind dabei vollständig geklärt, wie beispielsweise die stabilen Lattice Boltzmann Modelle mit grösseren Gittern sowie



Figur 1. Lattice Boltzmann Simulation von dreidimensionalen turbulenten Strömungen (Taylor Green vortex flow at $Re = 5000$).

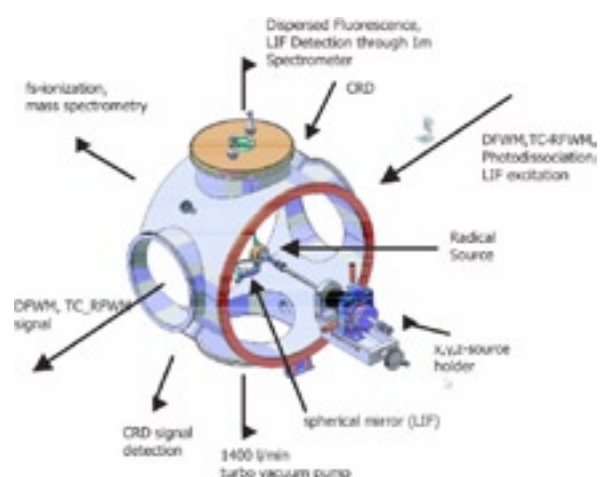
die praktischen Fragen der effektiven Anwendung. Das mikroskopisch abgeleitete thermische Modell verbessert im Wesentlichen die früheren Ergebnisse der isothermen Modelle, was unter anderem mit einer neuen Klasse der exakten Lösungen bewiesen wurde. Die entwickelten sehr effizienten Modelle ersetzen kostspielige mikroskopische Simulationstechniken wie kinetisches *Monte-Carlo* und/oder molekulare Dynamik für niedrige *Mach*-Zahl und moderate *Knudsen*-Zahl. Die Ergebnisse wurden in zwölf Publikationen und Preprints dargestellt.

Es eröffnen sich die 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.

Der Zündvorgang von brennbaren Gemischen hat wesentlichen Einfluss auf die Schadstoffentwicklung und die Effizienz des Verbrennungsprozesses. Neben Formaldehyd spielen Peroxylradikale eine wesentliche Rolle beim Zünden brennbarer Gemische. Sie bestimmen das Zündverhalten und beeinflussen die Speziation der anfänglich vorhandenen Zwischenprodukte und somit die Entwicklung weiterer Reaktionen. Im Projekt ***Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion*** [2] wird die Rolle der Peroxylradikale in einer *kalten* Flamme ($< 1000\text{ K}$) untersucht. Diese Aufgabe ist nicht theoretisch, sondern nur im Experiment lösbar. Für die Darstellung von Peroxylen wurde eine neue Molekularstrahl Apparatur konstruiert und in Betrieb genommen (Fig. 2). Eine neuartige Radikal-Quelle wurde installiert. Radikale können darin mit Hilfe einer einstellbaren elektrischen Gasentladung dargestellt werden. Mit einem zusätzlichen Ventil kann ein Gas dem aus der Entladungskammer strömenden Gas beigemischt werden. Damit ist es möglich, erzeugte Radikale mit neutralen Molekülen reagieren zu lassen.

Die neue Versuchseinrichtung erlaubt, lineare und nicht lineare spektroskopische Messungen

gleichzeitig an Molekülen in einem Molekularstrahl durchzuführen. Das Kohlenstoff-Trimer C_3 wurde simultan mit einer Zweifarben-Vier-Wellen-Spektroskopie, mit Laser Induzierter Fluoreszenz (LIF) und mit *Cavity Ringdown Spektroskopie* (CRD) vermessen.



Figur 2: Versuchapparat für nichtlineare spektroskopische Messungen in einem Molekularstrahl.

Die bisher durchgeführten massenspektrometrischen Versuche, um ionisierte Alkyl-Peroxyl-Radikale nachzuweisen, waren erfolglos. Evtl. gelingt dieser Nachweis nicht, da Peroxyl-Ionen, wie vermutet wird, keinen stabilen Ionenzustand aufweisen. Der Beweis für diese Vermutung oder deren Gegenteil konnte noch nicht schlüssig erbracht werden. Weitere Versuche, die am PSI an der *Chemical Dynamics Beamline* am SLS-Synchrotron durchführen werden, sollen Klarheit schaffen. Femtosekunden-Spektroskopien wurden auf Di-Terbutyl angewandt. Die erhaltenen Signale können auf Anhieb noch nicht interpretiert werden. Die Forscher des PSI rechnen mit einem grösseren Aufwand, um Dissoziationsprozesse zustandsspezifisch angehen zu können.

Die nun zur Reife gebrachte *Photo-Fragmentation-Excitation* (PHOFEX) sowie die *fs-Vierwellen-*

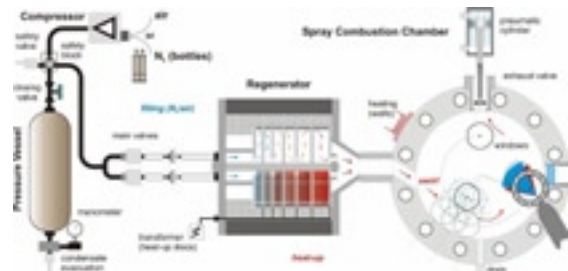
Methode (fs-CARS) wird weiterhin auf H_2CO und HCO angewendet. Diese Arbeit wird im Rahmen von zwei Doktorandenarbeiten vom SNF unterstützt. Zudem werden die Messmethoden im Hinblick auf die kommenden Peroxyl-Untersuchungen weiterentwickelt und modifiziert.

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. Ein Beitrag des LAV in Zusammenarbeit mit Wärtsilä umfasst die Entwicklung eines experimentellen Versuchsträgers, der das Verbrennungssystem grosser 2-Takt-Schiffsdieselmotoren unter Berücksichtigung der charakteristischen Bedingungen weitestgehend repräsentieren soll. Damit wird es möglich sein, die benötigten Referenzdaten für die Simulationsmodelle zu generieren.

Die Entwicklung des bei *Wärtsilä* Schweiz in Oberwinterthur aufgebauten neuen Versuchstandes hat im Berichtsjahr entscheidende Fortschritte gemacht. Zunächst konnte die Zusammenstellung des Prüfstandes um die noch fehlenden Elemente, Komponenten und periphere Geräte ergänzt werden, wobei sich insbesondere auch der komplexere Zusammenbau des Prozessgas-Aggregates erfolgreich abschliessen liess. Ferner wurden die unverzichtbaren Umbauten in Form eines eigenen Laborgebäudes durchgeführt, welches den spezifischen Anforderungen (Sicherheitsbeplankung und Überdruckklappen) des nicht ganz ungefährlichen Experimentes genügt. Ein wesentlicher Aspekt bestand auch in der Ausführung des unentbehrlichen und hinsichtlich schiffsdieselmotorischer Verbrennung realistischen Einspritzsystems, inklusive Nebenaggregate, Brennstoffkonditionierung sowie dessen Ansteuerung. Ausserdem sind grösste Anstrengungen in Bezug auf die relativ komplexe Steuerung der Anlage unternommen worden. Dies bezieht sich auf einen reibungsfreien und flexiblen Betrieb unter Berücksichtigung aller Sicherheitsaspekte, auf die Evaluation der elektrischen Schaltschränke bis hin zur Entwicklung spezifischer elektronischer Komponenten sowie auf sämtliche Vorarbeiten im Hinblick auf die geplanten messtechnischen Untersuchungen.

Die Inbetriebnahme der Versuchsanlage (Fig. 3) soll 2007 erfolgen. Aufgrund der Komplexität der einzelnen Teilsysteme wird mit einer längeren Testphase gerechnet. Der Projektabschluss wurde in Absprache mit den Projektpartnern und der EU auf den Herbst 2007 verschoben. Danach

werden die Forschungspartner einen auch nach internationalen Massstäben einzigartigen Prüfstand verfügen um ihre Wettbewerbsfähigkeit auf diesem Gebiet zu erhöhen.



Figur 3: Schema der gesamten Versuchseinrichtung mit Darstellung der Aufheizphase.

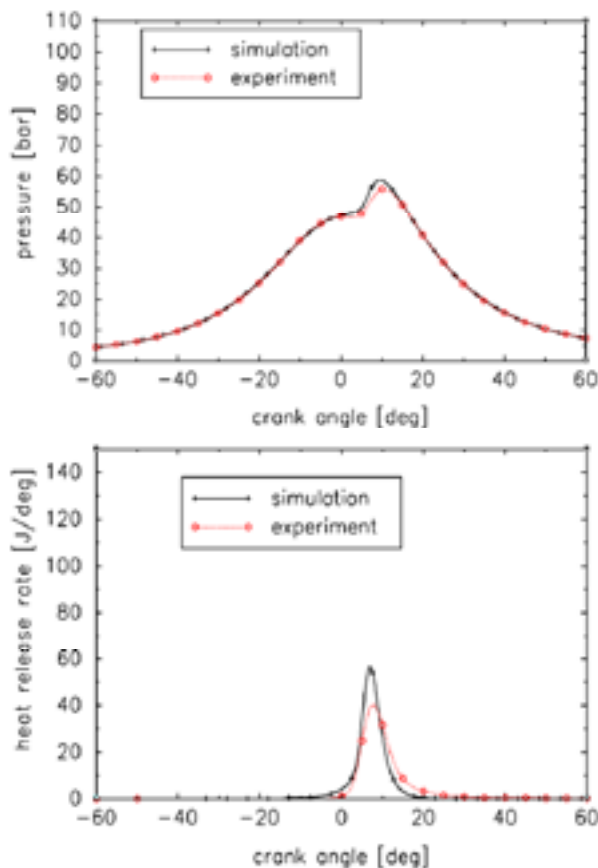
ERHÖHUNG UMWANDLUNGSEFFIZIENZ UND SCHADSTOFFREDUKTION

Für die zukünftige Gestaltung von emissionsarmen und umwandlungseffizienten Brennverfahren ist die gezielte Abstimmung der Kraftstoffeigenschaften mit den Anforderungen des Motorbetriebs in der jeweiligen Anwendung von grosser Bedeutung. Dabei liegt der Schwerpunkt auf realisierbaren Mehrkomponentenkraftstoffen – und zwar entweder auf herkömmlichen oder solchen, die im Sinne eines *designer-fuel* entsprechend konfiguriert werden können. Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der selbstgezündeten, im Idealfall homogenen Dieselvebrennung (HCCI-Systeme) stehen im Zentrum des Interesses der motorischen Brennverfahrensentwicklung.

Dem Potential nach Reduktion der Stickoxid- und Russpartikelemissionen bis gegen null stehen Herausforderungen gegenüber, welche mit der typischerweise äusserst schnellen Energieumsetzung und dem damit einhergehenden Lärm, aber auch mit der Schwierigkeit, den Verbrennungsbeginn – in Abwesenheit von externer Zündung bzw. später Kraftstoffeinspritzung – im ganzen Kennfeldbereich kontrollieren zu können. Insbesondere bei höheren Lasten – und eher bei niedrigen Drehzahlen – kommt die Selbstzündung üblicherweise zu früh mit schwerwiegenden Konsequenzen für Spitzendruck, thermodynamischen Wirkungsgrad usw. Zusätzliche Schwierigkeiten ergeben sich aus dem instationären Betrieb für den Fahrzeugantrieb und den von Zylinder-zu-Zylinder streuenden thermischen bzw. thermochemischen Daten (T , λ , AGR).

Im Projekt **Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse** [4] werden Ansätze zur Simulation homogener kompressionsgezündeter Brennverfahren sowie experimentelle Ergebnisse zu den Grundlagen der Selbstzündung von n-Butan und n-Heptan in einem optisch zugänglichen Einhubtriebwerk (EHT) vorgestellt. Die

Arbeit hat folglich einen rechnerischen sowie einen experimentellen Teil. Eine Kernaufgabe der Simulation ist die Reduktion von detaillierten zu skelettartigen Reaktionsmechanismen. Die Mechanismen weisen eine hervorragende Übereinstimmung mit der detaillierten Chemie in einem breiten Bereich von λ und ε auf. Im weiteren wurden die Mechanismen für verschiedene Kraftstoffqualitäten (Cetanzahlen) optimiert. Diese Arbeit stellt zwei Ansätze für die Simulation der Verbrennung vor. Das erste Modell ist ein stochastisches Mehrzonenmodell. Es berücksichtigt die Existenz verschiedener Zonen im Brennraum, die eine stochastische Initialisierung der Temperatur und des Luftkraftstoffverhältnisses um einen Mittelwert aufweisen. Das Modell zeigte eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment innerhalb der Messunsicherheit (Fig. 4). Das zweite in dieser Arbeit präsentierte Konzept ist ein dreidimensionales strömungsmechanisches Modell, gekoppelt mit reduzierter Reaktionskinetik und einem CMC-Ansatz für die Schliessung der Interaktion zwischen Turbulenz und Chemie. Das Modell zeigte eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Experiment und hat sich z.B. als fähig erwiesen, auch die grosse Sensitivität der Verbrennung auf kleinste Änderungen der Abgasrückführung (AGR), wenn sehr hohe AGR-Raten verwendet werden, wiederzugeben.



Figur 4: Vergleich des berechneten Druckverlaufs (links) bzw. der Wärmefreisetzung (rechts) mit den Messungen für Betriebspunkt 1 ($n = 1200$ U/min, 20 Temperaturzonen, 10 Lambdazonen, $\lambda = 3.8$, $\sigma_T = 2.5$ K, $\sigma_\lambda = 0.05$, n-Butan, reduzierter Mechanismus, $\alpha_{\text{scaling}} = 0.5$).

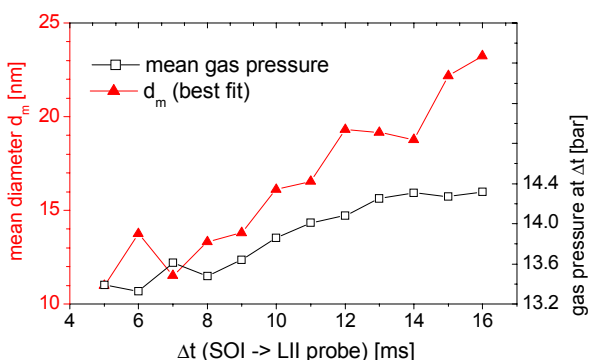
Im experimentellen Teil der Arbeit wurden unter definierten Zuständen (λ , p , T , AGR) die thermodynamischen Zustände im Brennraum bei Zündung sowie die Lokalität der Zündung für die Kraftstoffe n-Butan, n-Heptan sowie kombinierte Einspritzungen von n-Butan und Diesel untersucht. Von speziellem Interesse war die Lage sowie die Beeinflussung der sog. Tieftemperatur Reaktion (LTR) und Hochtemperatur Reaktion (HTR) in Abhängigkeit von diversen Betriebsparametern. Die Grundlagenuntersuchungen der homogenen Kompressionszündung wurden an einem sehr flexiblen und optisch gut zugänglichen Einhubtriebwerk durchgeführt. Der Vergleich zwischen Experiment und den innerhalb des numerischen Teils der Arbeit entwickelten Reaktionsmechanismen für n-Butan zeigten eine gute Übereinstimmung. Mit den Resultaten sind bessere Aussagen zur Selbstzündung von homogenen Gemischen in motorischen Anwendungen in Abhängigkeit von verschiedenen Betriebsparametern möglich, insbesondere im Hinblick auf die Validierung von Simulationsalgorithmen. Darüber hinaus haben die Messungen und die Berechnungen einen wesentlichen Beitrag zum vertieften Verständnis der Grundlagen der motorischen HCCI-Verbrennung geleistet.

Im Projekt **Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressures** [5] werden empfindliche und quantitative optische Messverfahren weiter entwickelt, um die innermotorische Entwicklung der Russpartikelgrösse bei der Dieselverbrennung möglichst on-line und in-situ im Verbrennungsraum zu beobachten. Hierdurch wird ein besseres Verständnis der Russbildung und Russoxidation als Funktion verschiedener Betriebsparameter der Einspritzzelle, d.h. Verbrennungsbedingungen erwartet. Im laufenden Projekt werden dazu Experimente, hauptsächlich mittels in-situ bildgebender optischer Methoden zur Visualisierung zweidimensionaler Russ- und Flammenfront-Verteilungen, in einer Hochtemperatur-Druckzelle unter den Bedingungen Diesel-motorischer Verbrennung ausgeführt. Neben einer hohen örtlichen und zeitlichen Auflösung der betrachteten Vorgänge liefern die angewendeten Verfahren auch quantitative Informationen beispielsweise über Temperatur, Partikelgrössen oder gemessene Konzentrationen.

Zur Bestimmung der mittleren Partikelgrössen von Russ während der Diesel-Verbrennung setzt das PSI die Methode der zeitaufgelösten **Laser-Induzierten Inkandescenz (LII)**, an der am PSI betriebenen Hochdruck-Einspritzkammer ein. Das 2-Farben LII Experiment zur in-situ Bestimmung der Russpartikelgrösse und simultaner Registrierung räumlich aufgelöster Russemissions-Spektren wurde weiter verbessert. Transiente LII-Signale wurden zu verschiedenen Zeitpunkten nach

Einspritzbeginn bei einem Gegendruck zwischen 1 und 3.5 MPa und bei Einspritzdrücken von 50-130 MPa aufgezeichnet.

Das Abkühlverhalten der laser-aufgeheizten Partikel wurde durch Lösung der Transportgleichungen für Masse und Energie berechnet und die ermittelte LII-Signalintensität in einem *least-squares* Verfahren unter Einsatz eines geeigneten thermophysikalischen Modells 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 (Fig. 5).



Figur 5: Zunahme der mittleren Partikeldurchmesser der Russteilchen (Dreiecke) und mittlerer Gasdruck (Quadrate) als Funktion der Zeit zwischen Einspritzbeginn und LII-Laserpuls.

Um den Einspritzvorgang unter veränderten Betriebsbedingungen detaillierter untersuchen zu können, wurde eine kombinierte Messanordnung aufgebaut, welche die simultane Aufzeichnung von Schattenwurf- und Schlierenaufnahmen mit 2 separaten Kameras bei hoher zeitlicher Auflösung erlaubte.

Um bei Gasturbinenprozessen den Wirkungsgrad weiter zu erhöhen ($\eta > 60\%$) und die Emissionen noch stärker zu reduzieren ($\text{NO}_x < 10\text{ppm}$) müssen auch neue Brennverfahren untersucht werden. Im nun abgeschlossenen Projekt **Partial Catalytic Oxidation of CH₄ to Synthesis Gas for Power Generation Application** [6] wurde die viel versprechende katalytisch unterstützten Verbrennungsverfahren, die auf grundsätzlich neuen Brennstoff-Umwandlungsverfahren basieren, geprüft. Dabei wurde die partielle katalytische Oxidation (PCO) von Methan zu Synthesegas (H_2 und CO) unter gasturbinen-relevanten Bedingungen

über einem Rhodium-Katalysator experimentell und numerisch im Druckbereich von 4 bis 10 bar untersucht. Das zugeführte Methan-Sauerstoff-Gemisch wurde mit grossen Mengen von H_2O und CO_2 verdünnt (bis zu 70 Vol.-Prozent), um neue Stromerzeugungs-Zyklen zu simulieren, welche mit einem hohen Grad von Abgas-Rückführung arbeiten. Experimente wurden in einem optisch zugänglichen Kanalströmungs-Reaktor durchgeführt, der in situ Messungen mit Lasermesstechniken erlaubt, sowie in einem massstäblich verkleinerten katalytischen Gasturbinen-Reaktor. Voll elliptische zweidimensionale numerische Codes für stationäre und transiente Fälle wurden benutzt. Sie enthalten chemische Reaktionsschemas für heterogene und homogene Elementarreaktionen. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- Heterogene (katalytische) und homogene (Gasphasen-) Reaktionsschemas wurden validiert für die partielle katalytische Oxidation von Methan mit einem hohen Grad von Abgasrückführung.
- Die Auswirkungen von zugefügtem H_2O und CO_2 wurden aufgeklärt. Das zugefügte H_2O erhöhte den Grad der Methan-Umsetzung und die Selektivität für Wasserstoff, während die CO-Selektivität vermindert wurde. Die Auswirkungen von zugefügtem CO_2 auf die Chemie (trockene Reformierung) waren minimal.
- Das numerische Modell reproduzierte die gemessenen katalytischen Zündzeiten. Des weiteren wurde gezeigt, dass die chemische Auswirkung von H_2O und CO_2 auf die katalytischen Zündverzugszeiten minimal war.
- Die Dispersion des Edelmetalls nahm mit verschiedenen Trägermaterialien zu, und zwar in der Reihenfolge Rh/a- Al_2O_3 , Rh/ ZrO_2 , und Rh/Ce- ZrO_2 . Es wurde eine offensichtliche Beziehung zwischen der Dispersion des Edelmetalls und dem katalytischen Verhalten gefunden.

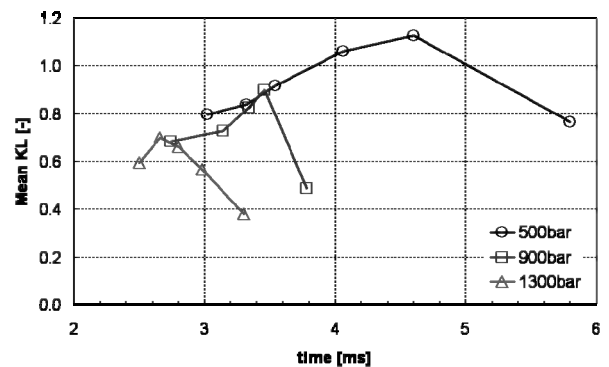
Mit seiner PCO-Fachkompetenz nimmt das PSI zusammen mit 10 europäischen Partnern am EU-Projekt *Advanced Zero Emission Power* teil.

Beim Einsatz berührungsloser optischer Messverfahren wird eine Analyse der Verbrennungsprozesse benötigt, um ein Verständnis für die Russbildung und der dabei einhergehenden Oxidationsprozesse zu erlangen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden im Projekt **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** [7] experimentelle Untersuchungen in einer Hochtemperatur- und Hochdruckzelle HTDZ am LAV der ETH Zürich durchgeführt. Zur Untersuchung der Russbildung bei transienten Dieselstrahlen wurden die beiden laseroptischen Verfahren Mehrwellenlängenpyrometrie und *back diffused laser technique* (BDL) simultan angewandt. Basierend

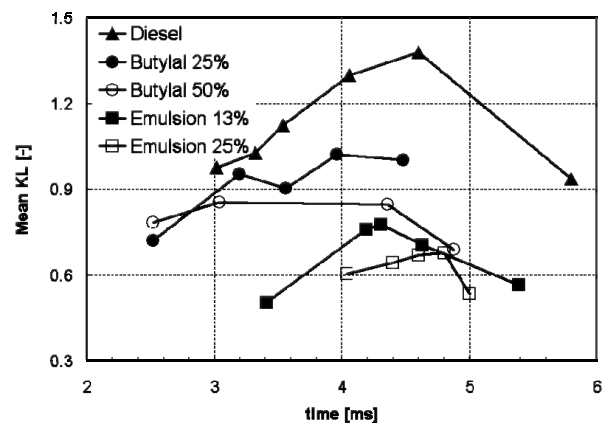
auf dem aufgezeichneten Drucksignal und dem detektierten Flammenlicht wurde eine Analyse zur Identifizierung des Zündverzugs, der Dauer der Vormischverbrennung, des Einsatzes der diffusiven Verbrennung und der gesamten Brenndauer durchgeführt. Zum Einsatz kamen ein Referenzdieselmotorkraftstoff, sowie unterschiedliche Zumischungen von Butylal (sauerstoffhaltig) und Wasser-Dieselemulsionen. Der Einspritzdruck wurde variiert und sowohl der eingespritzte Massenstrom, die Zelltemperatur als auch der Zelldruck vor dem Einspritzen wurden konstant gehalten. Die Bildung von Partikelemissionen wurde unter gleichen Bedingungen untersucht.

Obwohl die nach dem Pyrometerverfahren berechneten KL-Faktoren (ein Mass für die Russkonzentration) höher sind als die des BDL-Verfahrens, sind der Trend der mittleren KL-Faktoren und deren zeitlichen Integration nach dem Einspritzen für beide Verfahren ähnlich. Darüber hinaus wurde der Einfluss des Einspritzdruckes untersucht, wobei die eingespritzte Kraftstoffmasse konstant gehalten wurde. Es zeigt sich, dass eine Änderung des Einspritzdruckes von 500 bar bis 900 bar einen Abfall der mittleren Temperatur und des volumetrischen Anteiles der Russwolke bewirkt. Von 900 bar bis 1300 bar bleibt sowohl die mittlere Temperatur als auch die Wärmeabgabe konstant, während das Maximum des volumetrischen Russanteiles zu höheren Werten tendiert, jedoch unter höheren Oxidationsraten (Fig. 6). Zuallerletzt wurde der Einfluss der Brennstoffeigenschaften untersucht unter Einsatz folgender Brennstoffzusammensetzungen: Diesel, zwei Mischungen (25% und 50% nach Masse) mit sauerstoffangereichertem Dieselmischzusatz (Butylal) und zwei Wasser-Diesel-Emulsionen (13% und 25% nach Masse). Pyrometerergebnisse zeigen auf, dass die mittlere Temperatur der Russwolke als eine Funktion des Brennstoffgemisches abfällt mit folgender Reihenfolge: Diesel, Butylal-Diesel 25%, Butylal-Diesel 50%, Wasser-Diesel-Emulsion 13% und 25%. Sowohl der KL-Faktor als auch dessen zeitliche Integration zeigen den gleichen Trend auf (Fig. 7). Butylal beinhaltet Sauerstoff und weist im Vergleich zum Diesel eine höhere Cetanzahl auf. Die höhere Konzentration von Sauerstoff im Gemisch ermöglicht eine

bessere Russoxidation. Emulsionen beinhalten Wasser, das die Flammtemperatur herabsetzt und den Zündverzug vergrößert. Der Kühleffekt des verdampfenden Wassers hängt vom eingespritzten Wasseranteil im Gemisch ab. Die Tröpfchenverdampfung des Wassers bewirkt eine sekundäre Atomisierung und begünstigt damit die Vermischung von Luft und Brennstoff. Die gewonnenen Ergebnisse werden eingesetzt um derzeitige Modellierungen der Verbrennungsvorgänge in Dieselmotoren im Hinblick auf Russbildung und Oxidationsvorgänge zu erweitern. Die im Rahmen dieses Projektes aufgebaute experimentelle Datenbank wird auch internationalen Partnern zur Verfügung gestellt.



Figur 6: Gemittelte KL-Faktoren mit Diesel bei verschiedenem Einspritzdruck.



Figur 7: Gemittelte KL-Faktoren bei verschiedenen Treibstoffen.

Nationale Zusammenarbeit

Die in den vergangenen Jahren aufgebaute und bewährte Zusammenarbeit innerhalb der Forschungsinstitute des ETH-Bereichs wie auch zur Industrie wurde 2006 weiterhin in zahlreichen Projekten erfolgreich genutzt und fortgeführt. So wurde beispielsweise im vom LAV der ETHZ bearbeiteten Projekt [1] eng mit der Gruppe für Grundlagen der Verbrennung des PSI zusam-

mengearbeitet. Im Berichtsjahr wurde daraus innerhalb des ETH-Kompetenzzentrums CCEM das gemeinsame Projekt *Computational Engineering of multiscale transport in small-scale surface based energy conversion* gestartet. Darin engagiert sind Institute und Projektgruppen der ETHZ, der EPFL, des PSI und der EMPA. Im vom LAV der ETHZ geleiteten Projekt [8] erfolgte eine Zu-

sammenarbeit im Bereich der Partikelmessung mit der EMPA. Zudem wird das Projekt auch gemeinsam mit der Industrie, namentlich der Firma *Liebherr Machines SA*, bearbeitet und finanziert. Eine direkte Zusammenarbeit der ETHZ mit der Industrie erfolgt auch im Projekt **HERCULES** [3]. *Wärtsilä Schweiz* (ehemals *New Sulzer Diesel*) ist der wichtigste Schweizer Partner in diesem von der EU mitfinanzierten Projekt. In zahlreichen Gasturbinenprojekten des PSI wird mit *Alstom Power* kooperiert. Auch hier erfolgt eine Mitfinan-

zierung durch den Industriepartner. Die Aktivitäten des *Schweizerischen Vereins für Verbrennungsforschung (SVV)* waren nach der grossen Tagung im Jahr 2005 [11] im Berichtsjahr eher reduziert. Die Hochschulkompetenzgruppe für Verbrennungsmotoren (HKV) [12] trifft sich jährlich zu einem Informationsaustausch über die Aktivitäten der verschiedenen Hochschulen. Auch zahlreiche Fachhochschulen sowie Akteure der Industrie sind dabei vertreten.

Internationale Zusammenarbeit

Eine intensive Kooperation zwischen schweizerischen und ausländischen Hochschulen und Industrieunternehmen erfolgt im genannten Projekt **HERKULES** [3]. Dieses Gemeinschaftsprojekt ist Teil des 6. EU-Forschungsprogramms [13]. Das Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme der ETHZ leitet im Arbeitspaket *Advanced Combustion Concepts* im Projekt *Combustion Process Simulation* das Teilprojekt *Test Facilities*. Neben der zuvor 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 durch die deutsche *Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV)* [18] massgeblich mitfinanziert Projekt [4] wurde dem LAV der ETHZ in einem Wettbewerb zugeschlagen. Damit wurde die Kompetenz und die internationale Konkurrenzfähigkeit der Schweizer Verbrennungsforschung bestätigt.

Mit über 1200 Teilnehmern, rund 300 Vorträgen und 480 Work in progress-Postern war das 31th **International Combustion Symposium** [17] 2006 in Heidelberg der grosse Treffpunkt der internationalen Forschergemeinschaft. Mit drei Vorträgen und diversen Postern war die Schweiz gut vertreten. Die u.a. vom BFE und BAW unterstützte ETH-Konferenz **über Combustion generated Nanoparticles** [14]

wurde im 2006 zum 10. Mal durchgeführt. Rund 300 internationale Teilnehmer tauschten vom 21.-23. August 2006 Erfahrungen und neues Wissen zu Russpartikeln und Feinstaubemissionen aus Verbrennungsprozessen aus.

Das BFE ist Mitglied des **Executive Committee** des **Implementing Agreements for Energy Conservation and Emission Reduction in Combustion** der Internationalen Energie Agentur IEA [15]. Verschiedene von einzelnen Forschungsinstituten bearbeitete Projekte so auch des PSI sind mit der per Ende 2006 beendete Bearbeitungsperiode abgeschlossen. Neu werden Projekte in länderübergreifenden Arbeitsgruppen (Collaborative Tasks) bearbeitet. Das PSI leitet das Projekt **Sprays in Combustion**. Die mit der Einführung der Collaborative Tasks eingeleitet Neuorientierung des Implementing Agreements wurde von der IEA End-Use Working Party begrüsst und das Agreement für die Periode 2007 – 2011 erneuert.

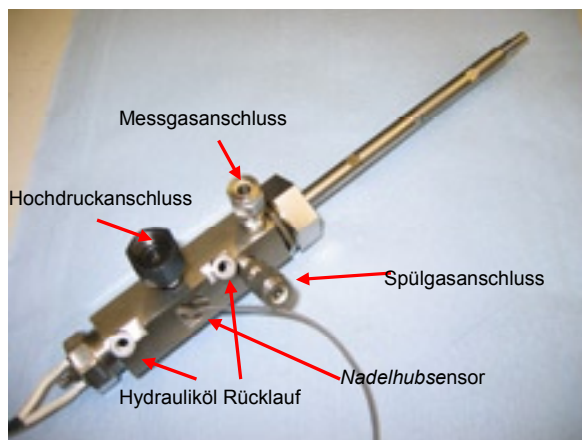
Durch die Mitarbeit in der **Working Party for Fossil Fuels WPFF der IEA** [16] erfolgt ein verstärkter Informationsaustausch zu den für die Verbrennung nach wie vor massgebenden Implementing Agreements über die fossilen Brennstoffe. Ein Schwerpunktthema dieser Arbeiten ist die Reduktion der Treibhausgasemissionen. Neben der Minderung durch die Verbesserung der Verbrennungssysteme ist auch die CO₂ Abscheidung und Endlagerung ein wichtiger Fokus.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Projekt **Darstellung des Technologiepotentials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO₂ Ausstoss** [8] sollten Möglichkeiten zur Reduktion der Schadstoffemissionen von Baumaschinen-Dieselmotoren ohne Erhöhung des Brennstoffverbrauchs und damit des spezifischen CO₂-Ausstosses untersucht werden. Der dafür vorgesehene Vierzylinder Diesel-Motor mit Vierventilkopf der Firma *Liebherr* konnte

während der Projektlaufzeit jedoch nicht geliefert werden. Die Forschungsarbeiten beschränkten sich deshalb auf die Entwicklung und die Herstellung der Messinstrumente, der Werkzeuge für die Entnahme von Gasproben am laufenden Motor sowie der Programme zur Auswertung der Messergebnisse und zur Simulation des Verbrennungsprozesses. Das an der ETH entwickelte Entnahmeventil (Fig. 8) stellte höhere Anforderungen an die Forschungs- und Entwicklungsar-

beit als zunächst erwartet. Die zulässige Zeit für die Gasentnahme liegt bei 0.6 Millisekunden. Im verfügbaren Zeitfenster muss eine für die Analyse genügende Gasmenge entnommen werden und das Entnahmeventil auch wieder gespült werden können. Der Druck von 100 bar und die Temperatur von 500°C müssen aufgrund der engen Platzverhältnisse im Zylinderkopf des Vierventilmotor von einer Sonde mit nur 1 Millimeter Wandstärke beherrscht werden. Mit Tests an einem Versuchskörper wurde nachgewiesen, dass die gewählte Konstruktion die Anforderungen erfüllt. An der Empa wurde die Messtechnik zur nachgeschalteten Russpartikelcharakterisierung entwickelt. Das im 3-D CFD Code programmierte Simulationsmodell für die Abbildung der Russsimulationen zeigt gut Übereinstimmung mit vorhandenen Messungen. Damit ist die Ausrüstung für die konkrete Projektarbeit vorbereitet. Die Lieferung des Versuchsmotors, der für die US-Abgasnorm Tier 3 zertifiziert sein wird, ist per 2007 vorgesehen. Das LAV und Verbrennungssysteme plant, in einer Industriekooperation das Potential zur Erfüllung der US-Abgasnorm *Tier 4*, die 2011 eingeführt wird, aufzuzeigen. Die zulässigen Emissionen von NOx und Partikeln liegen bei *Tier 4* um Faktor 10 tiefer als bei *Tier 3*.



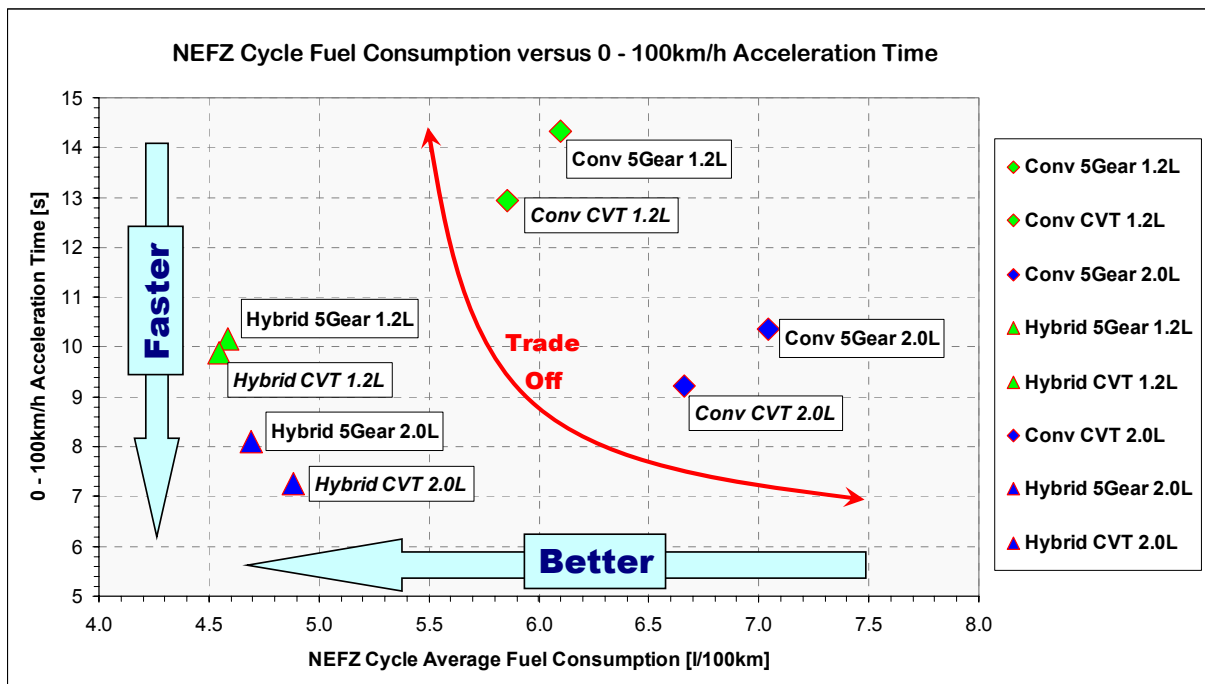
Figur 8: Zusammengebaute Entnahmesonde mit Bezeichnung der erkennbaren Anschlüsse.

Die Reduktion der CO₂ Emissionen gehört im Hinblick auf verschärfte Grenzwerte zu den Schlüsselaufgaben bei der Entwicklung neuer Fahrzeugmodelle. Neben der Verminderung des Treibstoffverbrauchs durch optimierte Verbrennungssysteme weisen insbesondere verbesserte Antriebskonzepte ein wesentliches Einsparpotential auf. Damit die Fahrzeuge schlussendlich auch marktfähig sind, muss das Beschleunigungsverhalten als Kriterium mitberücksichtigt werden. Der dadurch entstehende Trade Off zwischen

Sparsamkeit und Sportlichkeit kann nur durch technische Innovationen überwunden werden, wobei die Hybrid Antriebe (Verbrennungs- und Elektromotor) aus aktueller Sicht sicherlich das grösste Potential aufweisen. Hybrid Antriebssysteme sind komplex und können in vielen unterschiedlichen Varianten realisiert werden. Es ist daher unumgänglich, dass diese Varianten schon in der Konzeptphase mit einem guten Simulationswerkzeug unter möglichst realistischen Bedingungen untersucht werden können. Im Projekt **Massnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** [9] wurde ein Simulationswerkzeug erarbeitet, mit dem verschiedene Antriebssysteme bereits in der Konzeptphase unter möglichst realistischen Bedingungen untersucht werden können. In einer Bibliothek sind alle relevanten Komponenten von Fahrzeugen mit oder ohne Hybrid-Antrieb abgelegt. Damit können Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebskonzepten schnell und einfach zusammengestellt und auf virtuellen Teststrecken geprüft werden.

Der hier gewählte Ansatz unterscheidet sich grundsätzlich von anderen Simulationstools da hier das Fahrzeug direkt modelliert wird und nicht die Belastung resp. die Arbeitspunkte der Bauteile rückwärts aus dem Fahrzyklus berechnet werden. Mit dieser Methode kann das Fahrzeug auf jeder beliebigen Fahrstrecke untersucht werden, der Einfluss des Fahrers wird dabei ebenso berücksichtigt wie die Auswirkung einzelner Bauteiländerungen auf das Fahr- und Verbrauchsverhalten des gesamten Fahrzeugs.

Im Projekt wurden damit 8 unterschiedlich angetriebene, aber ansonst identische PKW's verglichen (zwei Motorgrössen, zwei Getriebetypen, mit/ohne mildem Hybrid Antrieb auf elektrischer Basis). Der Vergleich umfasste nicht nur den durchschnittlichen Treibstoffverbrauch im NEFZ-Standardzyklus sondern auch das Beschleunigungsvermögen bei einem Sprint von Null auf 100 km/h (Fig. 9). Es zeigt sich, dass das gleiche Fahrzeug ohne Verlust an Sportlichkeit zu einem wesentlich sparsameren Umgang mit dem Treibstoff gebracht werden kann: Ausgehend vom gewählten Basisfahrzeug (PKW der *Golf/Astra* Klasse) kann der Umbau des Antriebs von einem 105 kW 2.0 L Benzinmotor mit einem 5 Gang Handschaltgetriebe zu einem 75 kW 1.2 L Benzinmotor + 30 kW Elektromotor/Generator mit einem CVT-Getriebe den Treibstoffverbrauch im NEFZ Fahrzyklus um 35% reduzieren! (Von 7.0 L/100km auf 4.5 L/100km) Gleichzeitig verbessert sich die Sprintzeit auf 100 km/h mit dem Hybrid-Antrieb (*Booster*-Betrieb mit beiden Antrieben) um 5% (von 10.4 s auf 9.9 s).



Figur 9: Trade-off zwischen Treibstoffverbrauch und Beschleunigungszeit von Null auf 100 km/h.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Das Berichtsjahr war organisatorisch durch den Wechsel der Bereichs- und Programmleitung im BFE Forschungsprogramm Feuerung und Verbrennung geprägt. Bedingt durch die Pensionierung von Dr. A. Hintermann wurde die Bereichsleitung an F. Rognon (BFE interner Bereichsleiter) und die Programmleitung an St. Renz (BFE externer Programmleiter) übergeben. Dr. A. Hintermann unterstützte die Forschungsaktivitäten in der Schweiz seit 1988 durch gezielte Förderung von hochstehenden Fachkompetenzen und Versuchseinrichtungen wie die numerische Simulation, die Laserdiagnostik und die Entwicklung von Versuchsträgern insbesondere an der ETH und am PSI. Damit wurde einerseits die internationale Konkurrenzfähigkeit in ausgewählten Bereichen gestärkt, was beispielsweise durch die Partizipation an Forschungsprojekten der EU oder des FVV, der IEA sowie mit zahlreichen Beiträgen am renommierten *International Symposium on Combustion* bestätigt wurde. Aus der Zusammenarbeit mit der Industrie entstanden konkrete Lösungen und Produkte mit dem Fokus der Verbesserung der Energieumwandlungseffizienz und der Reduktion der Schadstoffemissionen.

Auf die laufenden Projekte hatte der Wechsel der Programmleitung keinen Einfluss. Sie wurden weitgehend wie geplant fortgeführt. Im Projekt *Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion* konnten die ionisierten Alkyl Peroxyl Radikale noch nicht wie gewünscht nachgewiesen werden. Mit der Möglichkeit an der am PSI ab 2007 zur

Verfügung stehenden *Chemical Dynamics Beamline* am SLS Synchrotron weitergehende Versuche durchzuführen, werden verbesserte Erkenntnisse erwartet. Durch die ausstehende Lieferung des Versuchsmotors konnten im Projekt [8] die konkreten Versuche noch nicht durchgeführt werden. Der Aufbau des komplexen Versuchsträgers im Projekt HERCULES ist weitgehend abgeschlossen. Die im 2007 vorgesehenen Tests zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit des Gesamtsystems werden mit grossem Interesse erwartet.

Neben den vorgenannten Arbeiten werden für das Jahr 2007 folgende Schwerpunkte gesetzt.

- Projektinitiierung für die Periode 2008 – 2011 gemäss den Vorgaben des neuen Energieforschungskonzepts des Bundes [10]
- Verstärkte Integration der Fachhochschulforschung ins Programm
- Stärken der Netzwerke zwischen den Forschungsinstitutionen und der Industrie
- Prüfung des Standes der Forschung im Bereich Feuerung
- Initiieren einer gemeinsamen Fachtagung mit den Akteuren im Bereich Feuerung und Verbrennung
- Realisierung der Webseite des Programms Feuerung und Verbrennung auf der Homepage des BFE

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 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** (JB).
- [2] T. Gerber et al., (thomas.gerber@psi.ch) PSI-Villigen: **Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion** (JB).
- [3] K. Hermann (hermann@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **HERCULES Advanced combustion concepts, Test facility: Spray/Combustion chamber** (JB).
- [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] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Partial Catalytic Oxidation of CH₄ to Synthesis Gas for Power Generation Application** (SB Projekt-Nr. 47734).
- [7] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** (SB Projekt-Nr. 47495).

Liste der P+D-Projekte

- [8] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO₂-Ausstoss** (SB Projekt-Nr. 47336).
- [9] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Massnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** (SB Projekt-Nr. 47715).

Referenzen

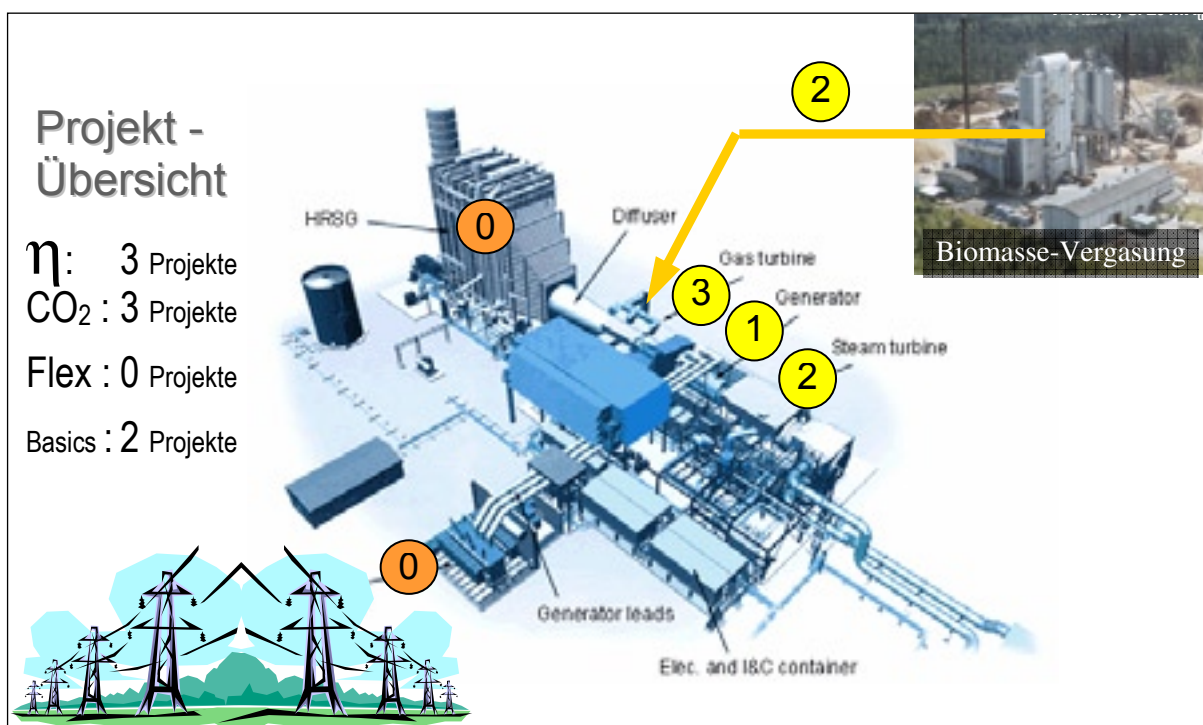
- [10] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007**, http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/index.html?lang=de&dossier_id=00798
- [11] Tagungsunterlage **SVV-Tagung** vom 30. September 2005.
- [12] **Hochschulkompetenzgruppe Verbrennungsmotoren** c/o J. Czerwinski, Abgasprüfstelle und Motorenlabor (AFHB), Hochschule für Technik und Informatik HTI, Biel (Jan.Czerwinski@bfh.ch)
- [13] 6. Rahmenprogramm für Forschung und Entwicklung der EU <http://cordis.europa.eu/fp6>
- [14] A. Mayer, TTM (ttm.a.mayer@bluewin.ch), Ed., *Proc. 9th ETH-Conference on Combustion generated Nanoparticles, August 2005*
- [15] IEA Internationale Energieagentur <http://www.iea.org>
- [16] WPFF Working Party for Fossil Fuels der IEA <http://www.iea.org>
- [17] International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh USA; <http://www.combustioninstitute.org>
- [18] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen FVV; <http://www.fvv.de>

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM KRAFTWERK 2020

Peter Jansohn

peter.jansohn@psi.ch



Übersicht und Zuordnung der Projekte im Programm Kraftwerk 2020

Die bisher insgesamt 8 Projekte ordnen sich den Hauptzielrichtungen «Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads», «CO₂-Emissionsminderung» und «Grundlagen» zu.

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. 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. 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 Aspekten 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 ausgenutzt 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.

Nach der detaillierten Ausarbeitung des *Programm-Konzeptes* [10] im Jahr 2005 stand 2006 die Initiierung von, der Ausrichtung des Programms entsprechenden Projekten im Vordergrund der Aktivitäten. Eine offizielle Auftakt-Veranstaltung am 29. März 2006 in Bern gab allen Interessierten die Möglichkeit, sich über die Zielsetzungen des Programms im Detail zu informieren und mit potentiellen Projektpartnern in Kontakt zu kommen.

Das Programm «Kraftwerk 2020» ist – ausgewiesen durch die Zuordnung zum gemeinsamen Bereich «Rationelle Strom- und Wärmeerzeugung» – insbesondere mit den Programmen «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 Energie-System zur erreichen, ist eines der verbindenden Themen. Aus der Bearbeitung übergreifender bzw. grundlegender verbrennungstechnischer Fragestellungen ergeben sich weitere verbindende Aktivitäten.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

Im Laufe des Jahres 2006 (vornehmlich allerdings erst gegen Jahresende) konnten erfreulicherweise bereits insgesamt 8 Projekte im Rahmen des Programms Kraftwerk 2020 initiiert werden. Neben der Förderung durch das Bundesamt für Energie (BFE) wird ein Teil der Projekte (4 Projekte) durch die Kommission für Technologie und Innovation (KTI) sowie (1 Projekt) durch den Forschungsfond der schweizerischen Energiewirtschaft (Swiss-ElectricResearch) finanziell unterstützt. Die Projektthemen lassen sich den Hauptzielsetzungen wie folgt zuordnen:

STEIGERUNG DES ELEKTRISCHEN WIRKUNGSGRADS

- **Turbogenerator mit höchstem elektrischen Wirkungsgrad (> 99%)**
beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen:
ALSTOM, Birr; von Roll Isola, Breitenbach; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch
Projektlaufzeit: 01.04.2006 bis 31.12.2009
- **Beschichtete Schaufeln und Ventile in Dampfturbinen**
beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen:
ALSTOM, Baden; Sulzer Metco, Wohlen; Stellba Schweisstechnik, Dottikon; Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf/Thun
Projektlaufzeit: 01.12.2006 bis 30.11.2009
- **Hoch-effiziente Dampfturbinenschaufeln («Schlanke Schaufel»)**
beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen:
ALSTOM, Baden; Zürcher Hochschule Winterthur (ZHAW), Winterthur; Hochschule für Technik und Architektur (HTA), Luzern
Projektlaufzeit: 01.01.2007 bis 31.12.2008

CO₂-EMISSIONSMINDERUNG

- **Hoch-effiziente Verdichter für Brenngase aus Biomasse**
beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen:
MAN Turbo, Zürich; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch; Hochschule Rapperswil (HSR), Rapperswil
Projektlaufzeit: 01.06.2006 bis 31.12.2008

- **Verbrennung von Syngasen**
beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen:
ALSTOM, Birr; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch; Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen
Projektlaufzeit: 01.11.2005 bis 31.12.2008
- **Gasturbinenprozess optimiert für CO₂-Minderung**
beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen:
ALSTOM, Birr; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch; Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen
Projektlaufzeit: 01.01.2007 bis 31.12.2009

GRUNDLAGEN-PROJEKTE

- **Laser-Diagnostik in sehr mageren Flammen**
beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen:
Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen
Projektlaufzeit: 01.08.2005 bis 31.12.2007
(übernommen aus Programm Feuerung und Verbrennung)
- **Optimierter Giessprozess von Gasturbinen-Komponenten**
beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen:
ALSTOM, Baden; PRECICAST, Novazzano; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch/Olten
Projektlaufzeit: 01.08.2006 bis 31.01.2008

STEIGERUNG DES ELEKTRISCHEN WIRKUNGSGRADS

Im Projekt **Turbogenerator mit höchstem elektrischen Wirkungsgrad (> 99%)** [1] wird angestrebt den Wirkungsgrad von grossen, luftgekühlten Generatoren (bis zu 400 MVA) bis über 99% zu steigern (derzeitige Stand der Technik: bis zu 98.7%) und damit auch einen Beitrag zur Steigerung des 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

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

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 ($>0.5\text{W/mK}$ anstelle der heute üblichen 0.26W/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. 0.35W/mK), aber gleichzeitig verbesserter Durchschlagsfestigkeit (3.5kV/mm anstelle der heute üblichen $2.5\text{--}3\text{kV/mm}$). Die höhere Durchschlagsfestigkeit erlaubt eine verringerte Isolationsdicke und ermöglicht dadurch ebenfalls eine bessere Wärmeübertragung. Bei der Herstellung von Probestäben zeigten sich Kompatibilitätsprobleme zwischen der HTC Isolation und den ALSTOM-spezifischen Imprägnierprozessen. Daher wurde mit Priorität am zweiten Lösungsweg gearbeitet. Eine erste Etappe besteht dabei darin, eine Isolation zu finden, 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 bereits erreicht

24 21200 ach MPers / 2005-2007
 Staat für: 171, 20.02.2007
 OLSchachling nach
 1000.94 R / 42 SW / BT

Die Aufgaben des Forschungspartners FHNW konzentrieren sich auf die aerodynamische Optimierung des Ventilatorrades und der Luft-Einlassgeometrie. Dazu ist in dieser ersten Projektphase ein Versuchsstand zu entwerfen und Vorbereitungen für die Strömungsmodellierung (mittels CFD-Simulationen) zu treffen. Dadurch soll eine Optimierung der Zuströmung zum Ventilator und realitätsnahe Tests von neuen Ventilatorauslegungen ermöglicht werden. Auf Basis erster Überlegungen und Berechnungen wurde ein Massstab des Ventilator-Modellprüfstands von 1:3 in Erwägung gezogen.

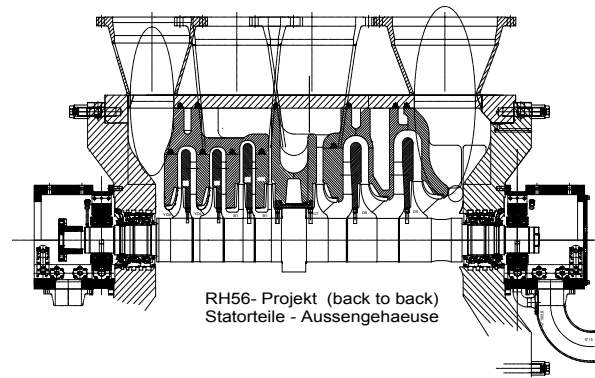
Der aus der Abwärme des heißen Gasturbinen-Abgasstroms gewonnene Dampf soll zur Wirkungsgrad-Steigerung auf möglichst hohe Temperaturen gebracht werden. Für Hochtemperatur-Dampfturbinen ($> 600^{\circ}\text{C}$) sind dann allerdings Beschichtungen gegen Oxidation und Erosion für die zzt. noch unbeschichteten ersten Schaufelreihen zu entwickeln. Durch Oxidation und Erosion rauhen die Schaufeloberflächen ansonsten während des Betriebs recht schnell auf und erhöhen die Reibungsverluste. Dadurch gehen bei einem Kraftwerk mit 1000 MW Leistung im Laufe der ersten Jahre etwa 20 MW (2% Leistungsverlust) verloren. Mit der Beschichtung von Dampfturbinenschaufeln wird grundsätzlich Neuland betreten, da diese Technologie bisher

nur in Gasturbinen verwendet wird. Neben den Dampfturbinenschaufeln muss aufgrund steigender Betriebstemperaturen auch für die Panzerung von Dampfventilen (wichtig zur Steuerung des Dampfmassenstroms beim An-/Abfahren der Anlage bzw. zur Notabschaltung) neue Lösungen zum Aufschweißen von Hartstofflegierungen gefunden werden, da bei einem Ventilschaden sehr hohe Schadensumme (>15 Mio. €) entstehen z.T. durch Sekundärschäden. Beide Massnahmen werden im Projekt verfolgt und sind wichtig, um höhere Dampfparameter in den nächsten Dampfkraftwerk-Generationen realisieren zu können. Im Rahmen des Projekts **Hoch-effiziente Dampfturbinenschaufeln («Schlanke Schaufel»)** wird eine neue Profil-Familie für Dampfturbinenschaufeln entwickelt, mit der - durch eine Verschlankeung des Schaufelprofils - höhere Wirkungsgrade erreicht werden sollen. Bisherige Begrenzungen des Schlankheitsgrades der Schaufeln werden durch eine genauere Berechnung der aerodynamischen Anregungskräfte, die verbesserte Berechnung der Schwingungsantwort des Schaufelkranzes sowie durch eine Erneuerung der Spannungsbeurteilung in den kritischen Querschnitten überwunden.

CO₂-EMISSIONSMINDERUNG

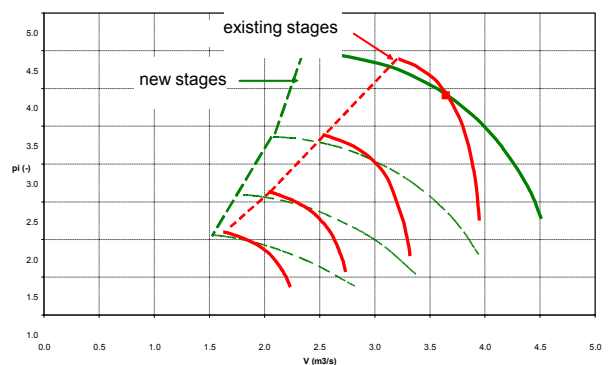
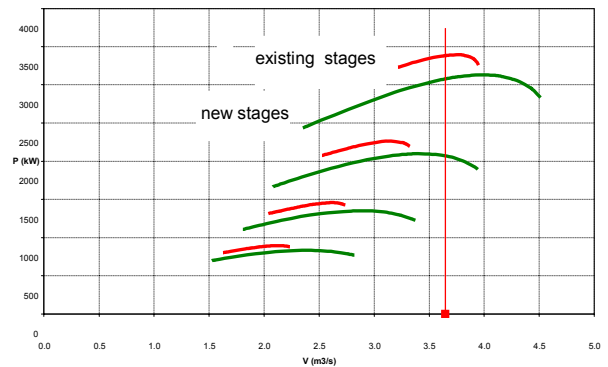
Im Projekt **Hoch-effiziente Verdichter für Brenngase aus Biomasse [4]** werden Kompressoren weiterentwickelt, die für die Förderung der Produktgase aus Vergasungsprozessen von Biomasse (aber auch von fossilen, nicht gasförmigen Energieträgern und kohlenwasserstoffhaltigen Prozessrückständen) benötigt 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 (siehe Fig. 2; dunkelschraffierte Teile), die eine, der Verdichtung niedermolekularer Gase (verursacht durch den hohen Wasserstoff-Anteil) angepasste Rotordynamik aufweisen.

Im Rahmen von Konzeptstudien wurden 4 Radialverdichterstufen neu ausgelegt, mit denen der gesamte gewünschte Durchsatzbereich ab-



Figur 2: Repräsentativer Verdichterschnitt.

gedeckt werden konnte. Die Stufenkennlinien dienen dann als Basis zur Auslegung eines ganzen mehrstufigen Verdichters. Es wurden damit repräsentative Verdichter ausgelegt, die mit einer bereits vorhandenen Verdichter-Baureihe verglichen wurden. Die Unterschiede hinsichtlich Maschinenwirkungsgrad (d.h. Leistungsaufnahme) und Fahrbereich sind erheblich (siehe Fig. 3) und sehr erfolgversprechend. In einer nächsten Projektphase sind darauf aufbauend nun entsprechende «Laufzeuge» (Verdichter-Räder und -Gehäuse) konstruktiv zu entwickeln und zu fertigen, um in einem Versuchsaufbau deren tatsächliche Leistungsdaten experimentell zu ermitteln.

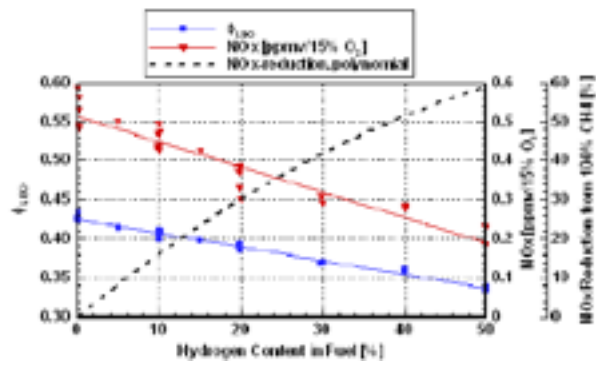


Figur 3: Einfluss der neuen Stufenauslegung auf das Betriebsverhalten eines mehrstufigen Verdichters. Unten: π -V-Kennfeld (Druckverhältnis-Volumenstrom); Oben: P-V-Kennfeld (Leistung-Volumenstrom).

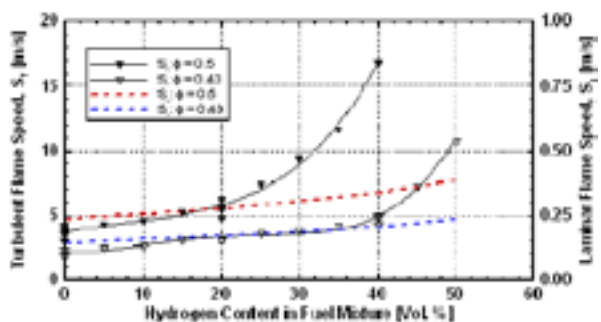
Die speziellen verbrennungstechnischen Besonderheiten beim Einsatz von Syngasen in Gasturbinen-Prozessen stehen im Mittelpunkt des Projektes **Verbrennung von Syngasen** [5]. Durch den hohen Anteil an Wasserstoff (H_2) weisen Syngase ganz spezielle verbrennungstechnische Eigenschaften (Flammengeschwindigkeit, Zündgrenzen, ...) auf, die bei der Auslegung von Brenner- und Brennkammer-Systemen berücksichtigt werden müssen, um einen sicheren (d.h. stabilen, nicht fluktuierenden) und emissionsarmen Betrieb zu gewährleisten. Sollen solche Brenngase auch in Gasturbinen eingesetzt werden, ist insbesondere die Druckabhängigkeit der genannten verbrennungstechnischen Eigenschaften mit in Betracht zu ziehen; diesbezüglich ist die vorhandene, allgemein zugängliche Datenbasis sehr dünn und soll in diesem Projekt durch zielgerichtete Experimente ergänzt werden. 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. Flammengeschwindigkeit).

Die Methoden zur Bestimmung dieser verbrennungstechnischen Eigenschaften (Flammengeschwindigkeit, Löschverhalten, NO_x -Emissionen) wurde für Methan/Luft – Vormischflammen unter gasturbinen-typischen Bedingungen im Projekt **Struktur und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruck-Flammen** [6] entwickelt und für einen breiten Bereich von Versuchsbedingungen (Druck, Vorheiztemperatur, Stöchiometrie, Turbulenz) quantitativ erfasst. In einer letzten Projektphase wurden bei diesen Versuchsreihen auch bereits Methan/Wasserstoff-Brenngasgemische eingesetzt, deren abweichendes Verhalten im Vergleich zu reinen Methan/Luft-Vormischflammen aus den Fig. 4 und 5 deutlich ersichtlich wird.

Mit steigenden Anteilen von Wasserstoff im Brenngasgemisch (Methan und Wasserstoff) werden die magere Löschgrenze und die minimalen NO_x -Emissionen sehr günstig beeinflusst. Bei einem Gehalt von 50 Vol. % Wasserstoff lässt sich eine NO_x -Reduktion von ca. 60 % im Vergleich zu einer reinen Methan/Luft-Flamme (0 Vol. % Wasserstoff) realisieren.



Figur 4: Löschgrenzen Φ_{LBO} und minimale NO_x -Emissionen von Methan/Wasserstoff-Vormischflammen ($T_{Luft}=673\text{ K}$, 5 bar, 40 m/s, Turbulenzgitter g365,xg10).



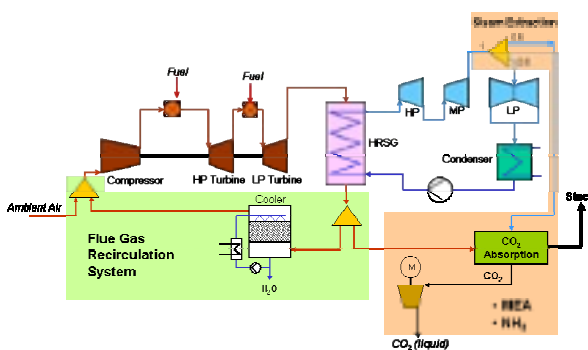
Figur 5: Löschgrenzen Φ_{LBO} und minimale NO_x -Emissionen von Methan/Wasserstoff-Vormischflammen ($T_{Luft}=673\text{ K}$, 5 bar, 40 m/s, Turbulenzgitter g365,xg10).

Für moderate H_2 -Gehalte (< 20 Vol. %) scheint die Zunahme der turbulenten Flammengeschwindigkeit S_T durch chemisch-kinetische Effekte d.h. durch die laminare Flammengeschwindigkeit S_L dominiert zu sein (laminare und turbulente Flammengeschwindigkeit zeigen einen parallelen Verlauf; Verhältnis $S_T/S_L \cong \text{konst.}$). Bei einem höheren H_2 -Gehalt (> 25 Vol. %) unterscheiden sich die Verläufe von S_T und S_L deutlich, insbesondere bei sehr mageren Brenngas/Luft-Verhältnissen ($\Phi=0.5$ bzw. $\lambda=2.0$). Die turbulente Flammengeschwindigkeit S_T nimmt deutlich stärker zu als S_L ; dies deutet auf zusätzliche Einflussfaktoren hin, wie z. B. bevorzugte Diffusion von Wasserstoff (Wasserstoff hat einen wesentlich höheren Diffusionskoeffizienten als Methan und kann sich deshalb in bestimmten Flammenzonen an- bzw. abreichern), und/oder Turbulenzeffekte (die wasserstoffreiche Flamme stabilisiert sich an einem anderen Ort im turbulenten Strömungsfeld, an dem die effektiven Turbulenzgrößen, die das Verhältnis S_T/S_L bestimmen können, verschieden sind).

Diese noch nicht abschliessend analysierten Untersuchungsergebnisse bilden eine wichtige Ausgangsbasis für die nun beabsichtigten Versuchsreihen mit Syngasen (CO/H_2 -Gemische), als auch mit Methan/Syngas-Gemischen ($CH_4/CO/H_2$),

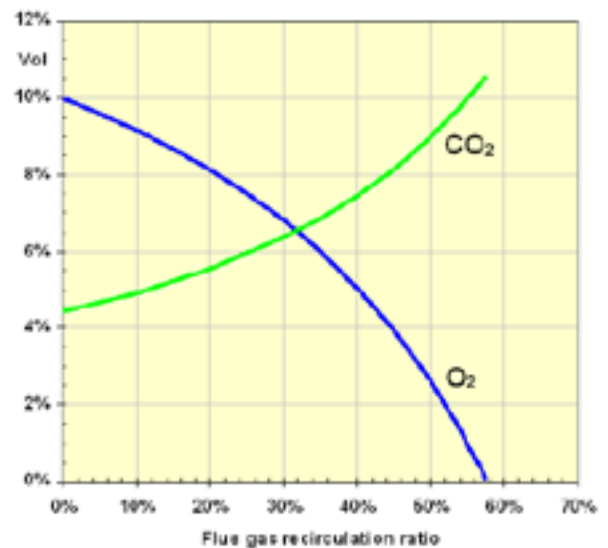
deren Verständnis dann besonders von Interesse ist, wenn (biogene) Syngase in erdgas-betriebenen Gasturbinen zugemischt werden sollen.

Mit einer speziellen Modifikation des Gasturbinen-Prozesses zur erleichterten Abscheidung von Kohlendioxid (CO_2) aus den Gasturbinen-Abgasen befasst sich das Projekt **Gasturbinenprozess optimiert für CO_2 -Minderung** [7]. Durch die gasturbinen-typische Betriebsweise mit sehr hohem Luftüberschuss, sind die CO_2 -Konzentrationen in Gasturbinenabgasen extrem niedrig und CO_2 -Abscheidemassnahmen entsprechend ineffektiv bzw. unmöglich. Es gibt deswegen Bestrebungen durch Prozessmodifikationen den CO_2 -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.



Figur 6: Schema eines Gas- u. Dampfturbinen-Prozesses mit Abgasrezirkulation und CO_2 -Abscheidung.

Die modifizierten Randbedingungen für das Verbrennungssystem ergeben sich bei der untersuchten Prozessvariante (siehe Fig. 6) 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 (siehe Fig. 7), 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 sicher (d.h. stabil) betrieben werden kann.



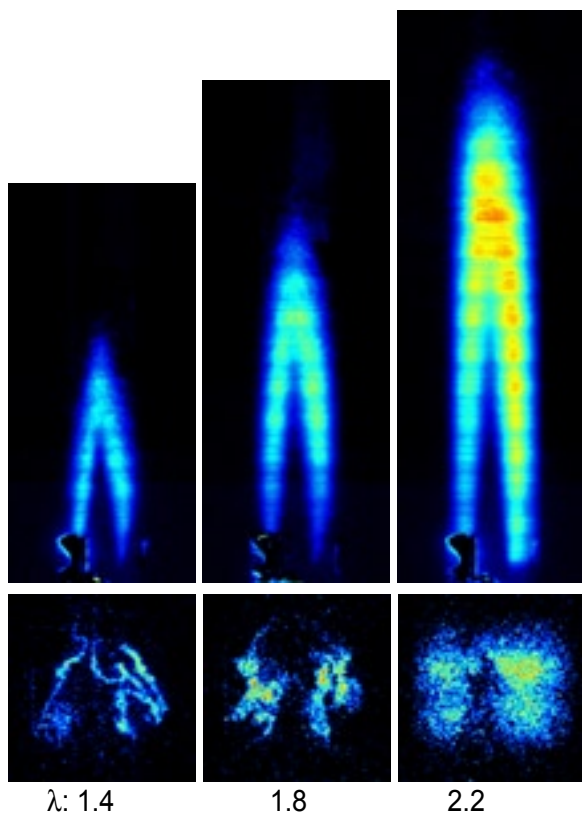
Figur 7: Einfluss der Abgasrezirkulation auf den Gehalt an CO_2 und O_2 im Abgas.

GRUNDLAGEN-PROJEKTE

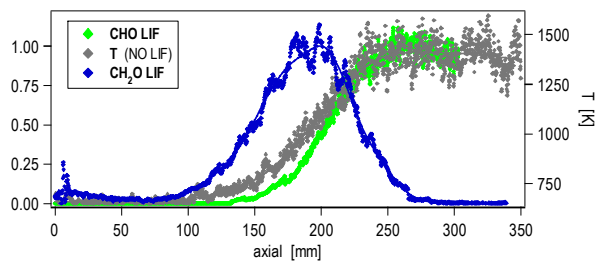
Im Projekt **Laser-Diagnostik in sehr mageren Flammen** [8] werden die laser-spektroskopischen Messmethoden (weiter)entwickelt, die notwendig sind um die Lage und Stabilität von Vormischflammen unter gasturbinen-typischen Bedingungen bestimmen zu können. Beim Einsatz von laser-optischen Messtechniken 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) (Fig. 8).

Darüber hinaus werden für die Untersuchung der Reaktionszone von extrem mageren Flammen weitere Radikale, wie Formyl (CHO) und Methoxy (CH_3O) interessant, die nach Aussage chemisch-kinetischer Modellrechnungen an Bedeutung gewinnen. Erstmals konnte das Formylradikal, CHO , in sehr mageren, turbulenten Vormischflammen mittels laser-induzierter Fluoreszenz, LIF, nachgewiesen werden. Dieses Radikal ist von Interesse, weil es unter anderem als Indikatorspezies für den Ort der maximalen Wärmefreisetzung in Kohlenwasserstoff-Flammen diskutiert wird (Fig. 9).

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,



Figur 8: Gemittelte (oben) und Einzelpuls (unten) CH_2O «laser induzierte Fluoreszenz»-Bilder einer turbulenten mageren Vormischflamme ($T_{\text{Luft}}: 773 \text{ K}$) für verschiedene Luftzahlen λ .



Figur 9: Normierte Profile von CHO , CH_2O LIF Signalen und der Temperatur in der Flammenfront einer mageren turbulenten Vormischflamme ($\lambda = 2.0$).

mit dem der Datenfluss im Entwicklungsprozess automatisiert und komplexe Simulationen in den Prozess integriert werden können. Das Simulationssystem wird auf die Herstellung eines Brennerbauteils und einer Turbinenschaufel angewandt. Da sich die Fertigungsqualität derartiger komplexer Gussteile wie Gasturbinenschaufeln und -brenner ohne Simulation nicht mit ausreichender Genauigkeit voraussagen lässt, soll der Giessprozess vollständig simuliert werden, um die teure und zeitaufwendige Entwicklung von Giessprototypen allein auf Validierungs-Abgüsse zu reduzieren. Der Erfolg des Systems soll sich an verbesserten Qualitäten der Gussteile bei gleichzeitig verkürzter Entwicklungszeit zeigen, was zu einer entsprechenden Kostensenkung führen würde.

Nationale Zusammenarbeit

Die Programmziele sind anwendungs- und umsetzungsorientiert ausgerichtet, weswegen eine starke Integration und Beteiligung der im angesprochenen Kraftwerksbereich tätigen Herstellerfirmen und Zulieferbetriebe unabdingbar notwendig ist. Ein zentrales Element stellen dabei die Hersteller von Turbomaschinen und Kraftwerksanlagen dar (*ALSTOM, MAN Turbo, Turbomach*), die mit ihren in der Schweiz angesiedelten Entwicklungs- und Produktions-Zentren den Garant für die Umsetzung der Programmergebnisse bieten und zusammen mit den in der Schweiz angesiedelten Zulieferfirmen (u.a. *Sulzer, Precicast, Stellba, von Roll, ...*) 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 akade-

mischen 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 Anfang 2007: 5.1 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 Auftakt-Veranstaltung am 29. März 2006 in Bern wurden bereits bestehende Kontakte zwischen interessierten Programmteilnehmern

wieder aufgefrischt bzw. neue Verbindungen geknüpft. Ausser in den regelmässigen Projekt-Sitzungen (mind. 2x jährlich mit allen Projektpartnern und dem Programmleiter) wird das nationale Netzwerk des Programms Kraftwerk 2020 in einer Jahresveranstaltung gepflegt (nächster Termin: Juni 2007), bei der ein Überblick über den Stand der Programm-Aktivitäten geboten wird und die Gelegenheit besteht sich nochmals über die Zielsetzungen und Rahmenbedingungen des Programms im Detail zu informieren und mit weiteren potentiellen Projektpartnern in Kontakt zu kommen.

Enge Verbindungen werden auch zum **Competence Center Energy & Mobility (CCEM-CH)** [11] 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-Minde- rung und Verbrennung von Syngasen) sind direkt mit Projekten im CCEM-CH verbunden. Es ist gewünscht und beabsichtigt diese Verknüpfungen noch weiter auszubauen.

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»** [12] 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.

Die europäische Integration wird durch die angestrebte Einbettung von Kraftwerk 2020 - Projekten im derzeit anlaufenden 7.Rahmenprogramm der

EU verfolgt. Durch aktive Teilnahme am Gestaltungsprozess der **EU Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants»** [13] erfolgt sowohl eine regelmässige Abstimmung der Aktivitäten mit anderen nationalen Programmen (Einsatz in der begleitenden Länderarbeitsgruppe «Mirror Group»), als auch die Mitgestaltung von gemeinsamen Entwicklungszielen und Arbeitsprogrammen (Mitwirkung in der Arbeitsgruppe «Taskforce Technology»).

Über Kontakte zu themenrelevanten Initiativen der **Internationalen Energie Agentur (IEA)** [14] wie der *Working Party for Fossil Fuels (WPFF)*, 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 und damit Möglichkeiten eröffnet durch gemeinsame Aktionen Projekte zu verwirklichen, die eine wesentlich grössere (internationale) Breitenwirkung entfalten und für die Schweiz allein ansonsten grundsätzlich gar nicht zu realisieren wären.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Da die Programmziele anwendungs- und umsetzungsorientiert ausgerichtet sind, ist bei einigen Projekten des Programms Kraftwerk 2020 bereits ein teilweiser Pilot- und Demonstrations-Charakter im Projektumfang integriert. Spezifische Pilot- und Demonstrationsprojekte sind derzeit jedoch nicht im Programm enthalten und werden auch zukünftig hauptsächlich über privatwirtschaftliche Initiativen abgedeckt werden müssen, da die für die interessierenden Kraftwerkstechnologien

notwendigen Pilotanlagengrössen (i.d.R. minimale Leistungsgrösse: 50 MW) und die damit verbundenen Finanzsummen kaum über öffentliche Mittel bereit gestellt werden können. In diesem Zusammenhang bieten ebenfalls bilaterale/internationale Kooperationen im europäischen Rahmen eine gute Gelegenheit in der Schweiz moderne Kraftwerkstechnologien zu demonstrieren, die eine Signalwirkung über die Schweiz hinaus (weltweit) ausüben.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Erfreulicherweise konnten im ersten offiziellen Programmjahr 2006 bereits insgesamt 8 Projekte im Rahmen des Programms Kraftwerk 2020 initiiert werden. Auch wenn der Projektbeginn in den meisten Fällen erst im Laufe des Jahres 2006 erfolgte, kann in den Jahresberichten der einzelnen

Projekte in den meisten Fällen bereits ein schöner Fortschritt verzeichnet werden. Das bereits im ersten Jahr dieses Projekt-Portfolio erreicht werden konnte, ist neben der Förderung durch das Bundesamt für Energie (BFE) auch zu grossen Teilen der sehr guten Unterstützung durch die

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. 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

Selbst bei einem Ausbau der Projektaktivitäten auf das geplante Gesamtvolumen von 15 Mio. CHF pro Jahr ist nicht zu erwarten, dass alle relevanten Fragestellungen in ausreichendem Masse mit den in der Schweiz zur Verfügung stehenden Ressourcen und Kompetenzen bearbeitet werden können. Umso mehr Bedeutung kommt deshalb der Einbindung und Abstimmung mit entsprechenden Initiativen in anderen europäischen Ländern und weltweit zu. Neben der Aktivierung aller möglichen Ressourcen (Projektpartner, Finanzierungsquellen) in der Schweiz wird deshalb die Integration der Programmaktivitäten in die laufenden internationalen Anstrengungen, vorallem im europäischen Umfeld, 2007 einen Schwerpunkt der Bemühungen zum weiteren Ausbau des Programms darstellen. In diesem Kontext kann u.a. versucht werden, eines der derzeit bereits in der Planungsphase befindlichen Gas- und Dampfkraftwerke als Pilot- und Demonstrationsanlage für eines der ersten «Null-Emissions»-Kraftwerke auf Erdgasbasis in Europa zu etablieren.

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN

Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM BRENNSTOFFZELLEN UND WASSERSTOFF

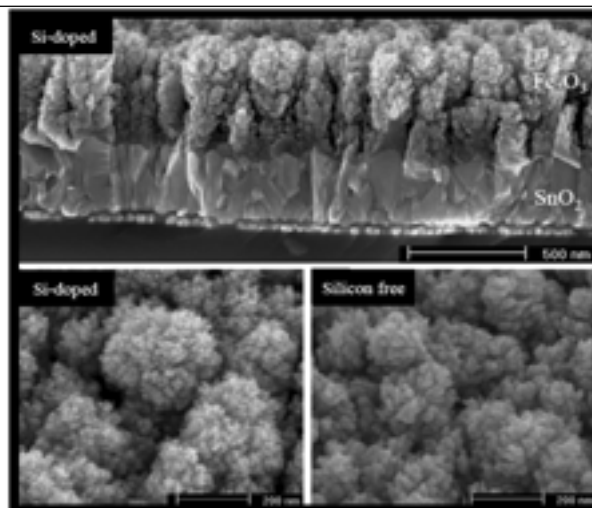
Andreas Luzzi, Michael Spirig, Andreas Gut

PLeitungHFC@hsr.ch, andreas.gut@bfe.admin.ch



Fünf Jahre Betriebsdauer für die 200 kW ONSI-Brennstoffzelle in Birsfelden

Mit ihren über 36'000 Betriebsstunden lieferte das ONSI PC25C-Brennstoffzellensystem, heute UTC Purcell, wertvolle Erfahrungen im Betrieb und der Integration von Brennstoffzellen in einem der grössten schweizerischen Wärmeverbundnetze.



Materialtechnologien als einer der Schlüssel zur nachhaltigen Wasserstoff-Produktion

Neue Depositionsverfahren zur Erzeugung Si-dotierter, nanokristalliner Fe_2O_3 -Filme, welche eine signifikant höhere Effizienz bei der photoelektrochemischen Wasserspaltung PEC bewirken, werden heute erfolgreich angewendet.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im Jahr 2007 stand die **Neuorganisation des Programms Brennstoffzellen und Wasserstoff** im Vordergrund. Zur Abklärung des Stands der Dinge und der Pläne für die Zukunft sollten alle Forschergruppen, Förderorganisationen und bestehenden internationalen Gremien besucht werden. Auf strategischer Ebene waren darauf basierend die grossen Linien für das Programm 2008 – 2011 festzulegen, die inzwischen ins *Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 – 2011* [33] integriert wurden. Auf Projektebene stand die Weiterführung laufender Projekte, die Behandlung von Gesuchen und die Definition neuer Projekte mit Ausrichtung auf die definierten Ziele im Vordergrund.

In den Bereichen der Festoxyd- (**SOFC**) und der Polymer-Brennstoffzellen-Technologie (**PEFC**) lauten die Forschungsschwerpunkte 2008 – 2011 wie folgt:

- Steigerung der **Lebensdauer und Zuverlässigkeit** der Zellen und Stacks und damit der Systeme.
- **Systemintegration** in Nischenmarkt-Anwendungen mit den Zielen (a) *Ausbau des erforderlichen Know-hows*, (b) *produktreife Abstimmung der Komponenten* und (c) *Proof of Concept*.
- **Verfügbarkeit**, resp., Lieferbarkeit der spezifizierten, leading-edge-Kernkomponenten für verschiedenste Anwendungen zu konkurrenzfähigen Preisen.
- **Kostensenkungen** in der ganzen Wertschöpfungskette und -Prozessen d.h. bei den Materialien, den Komponenten, dem System und der Integration zur Anwendung.

Konkret werden bis 2011 folgende Werte angestrebt:

- Zuverlässigkeit: Unterbrechungsfreier Betrieb:
> PEFC: 10 [h], SOFC 200 [h]
- Lebensdauer: Degradation um max. 20%:
> Mobil 250 [h], Stationär 1500 [h]
- Investitionskosten für die Brennstoffzelle:
< 5'000 – 15'000 [EURO/kW]

Im Bereich **Wasserstoff** fokussiert das Programm auf die Themenkreise:

H₂-Produktionsmethoden auf der Basis von erneuerbaren Energien, nämlich:

- Optimierung der Hochdruckelektrolyse im Hinblick auf die Wasserkraftstärken der Schweiz
- Umsetzung der in der Schweiz patentierten Tandemzellenphotoelektrolyse Entwicklung
- Demonstration von Wasserstoffherstellung aus solarthermochemisch gewonnenen Metalloxiden

H₂-Speicherung mittels Metallhydriden:

Angestrebt wird die Entwicklung von neuen Materialien und Systemen mit Anwendungsfokus im Mobilitäts- und Stationärbereich

Konkret werden bis 2011 folgende konkreten Entwicklungsschritte angestrebt:

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

Als Erreicht gelten die Ziele, wenn für diese international vergleichbaren Werte garantiert werden könnte, respektive Materialien und Demonstratoren mit entsprechenden Funktionalitäten vorliegen.

Längerfristig werden folgende Ziele angestrebt:

Analog der Umsetzungsstrategie der EU-Technologieplattform HFP für Wasserstoff und Brennstoffzellen sollen Einstiegsmärkte bei portablen Anwendungen bis 2010, bei stationären Anwendungen bis 2015 und in der Mobilität bis 2020 geschaffen werden. Die analogen Fragestellungen werden - mit unterschiedlicher Gewichtung - auch in den entsprechenden IEA-Implementing Agreements (AFC, HIA) und innerhalb der HFP-Plattform der EU mit Priorität behandelt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

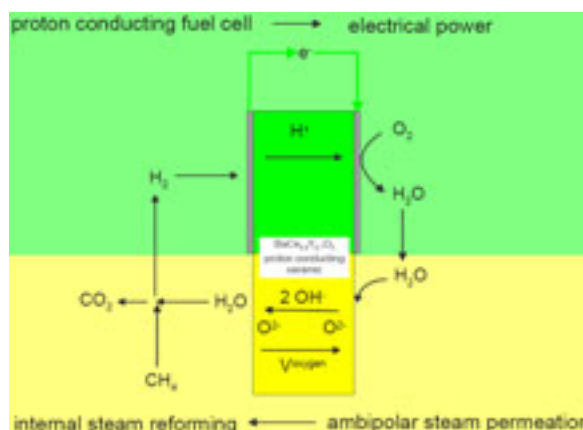
BRENNSTOFFZELLENTECNOLOGIE

SOFC-Brennstoffzellen

Das EU-Projekt **REAL SOFC** [1] strebt die Reduktion der Materialdegradation in SOFC-Zellen und Stacks mittels besserer Kathodenmaterialien und Beschichtungen an. Mit Langzeittests (> 3000 h) an SOFC-Stacks werden die Gründe der bisher aufgetretenen zu kurzen mittleren Lebensdauer (≈ 2500 h) analysiert. 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. Daher wurde von *HTceramix* und der EPFL parallel, in einem Projekt der KTI ein neues Stack-Design entwickelt, das auch die Abgase zurückführt. Das neue Design soll zur künftigen Referenz für SOFC-Materialtests werden und Testdauern von weit über 3000 h erlauben. Das Projekt ist noch in der Startphase, wobei der Prototyp (siehe Fig. 1) bereits



Figur 1: Erster Entwurf eines fortgeschrittenen Testset-ups für SOFC [1].



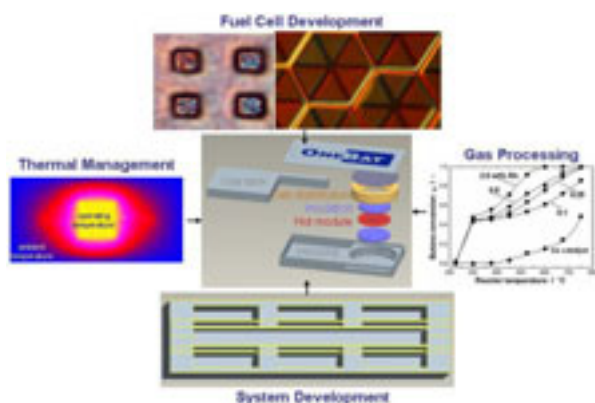
Figur 2: Funktionsweise einer protonenleitenden Brennstoffzelle [2].

erfolgreich realisiert wurde. *HTceramix* ist für das Stack-Design und die -Produktion und die EPFL für den Bau und Betrieb der Langzeit-Teststände verantwortlich. Im Rahmen von *REAL-SOFC* sind weitere Langzeit-Teststände mit ergänzenden Testzielen am VTT in Finnland, am EIFER in Karlsruhe und bei EdF in Paris im Aufbau.

Festoxid-Protonenleiter arbeiten im Temperaturbereich von $300 - 700^\circ\text{C}$. Sie haben Potenzial für eine verbesserte Brennstoffzellentechnologie, welche die Vorteile der PEFC- und der SOFC-Technologien kombiniert (siehe Fig. 2). Unter den protonenleitenden elektrolytischen Materialien ist das Y-dotierte Bariumzirkonat (BYZ) der vielversprechendste Kandidat. Das Ziel des Projektes **Intermediate Temperature Fuel Cells based on Ceramic Proton Conducting Electrolytes** [2] an der EMPA war die Synthese und Charakterisierung solcher Materialien. Es konnte gezeigt werden, dass BYZ aufskalierbar und mit hoher Phasenreinheit produziert werden kann. Die Leitfähigkeit von Protonen in BYZ wurde untersucht und im Bulkmaterial eine hohe aber an den Korngrenzen eine niedrige Protonenleitfähigkeit gemessen. Die Struktur von BYZ an der Korngrenze wurde als kritischer Parameter identifiziert. Jedoch konnte weder ein Zusammenhang zwischen Mikrostruktur und Leitfähigkeit noch eine andere Erklärung der niedrigen Protonenleitfähigkeit gefunden werden. BYZ könnte interessant werden für Anwendungen im Sensorenbereich; im Brennstoffzellenbereich ist aber das Verhalten des Materials noch zu komplex.

Das interdisziplinäre Verbund-Projekt **ONEBAT** [3], in dem die Kompetenzen von fünf Hoch- und Fachhochschulinstitutionen vernetzt sind, wurde 2004 mit Unterstützung des BFE unter der Leitung der ETH Zürich (<http://www.nonmet.mat.ethz.ch/>) gestartet. 2005 flossen durch ein KTI-Discovery-Projekt weitere Mittel in das umfangreiche Vorhaben. Vom BFE wurde zudem das Teilprojekt **ONEBAT: Micro Solid Oxide Fuel Cell on the Chip** [4] an der ETH Zürich unterstützt, in welchem die Mikro-Reformierung von Kohlenwasserstoffen experimentell und numerisch untersucht wurde. Hauptziele des Gesamt-Projekts sind die Entwicklung einer miniaturisierten Hybrid-SOFC als Batterieersatz für tragbare elektronische Geräte. Unterziele sind die Evaluation von Mikrofabrikationstechniken für SOFC-Materialien, die Integration der Gas-Aufbereitung, des Wärme-Managements und die Systementwicklung im Mikrobereich. Die technische Realisierbarkeit dieses Vorhabens wurde nachgewiesen. Die wesentlichen Erkenntnisse in den einzelnen Subsystemen (siehe Fig. 3) sind: a) freistehende Multischichtdünnschichten von SOFC-Materialien können mit Dünnschicht-Deposition und Mikro-Fabrikati-

on hergestellt werden, b) Freistehende Membrane können mittels Nickelgitterstrukturen geeignet verstärkt werden, c) eine hohe Butankonversion mit Wasserstoff-Selektivität höher als 85% konnte in einem Mikro-Reformer bei Temperaturen unter 550°C erreicht werden. Mittels Simulationen des thermischen Systems konnte ferner gezeigt werden, dass die anvisierte Temperatur von 500°C erreichbar ist [4]. Die Machbarkeit einer Mikro-Brennstoffzelle als Ersatz von Li-Ionen-Batterien konnte somit erfolgreich demonstriert werden. In einem neu lancierten CCEM-Projekt unterstützt vom *swisselectric research* Fonds wird zur Zeit weiter an der Umsetzung der Mikro-Brennstoffzelle gearbeitet.



Figur 3: ONEBAT: Mikro-Brennstoffzellenmodell und Hauptuntersystemresultate für die Zellenentwicklung, Gas-Processing, thermisches Management und Systementwicklung [3, 4].

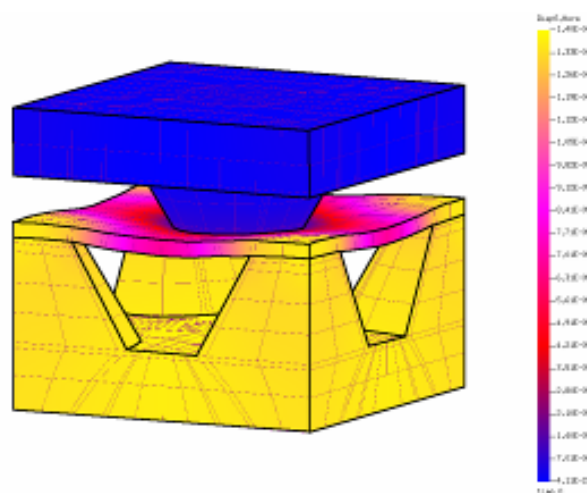
SOF-CH Research Consortium



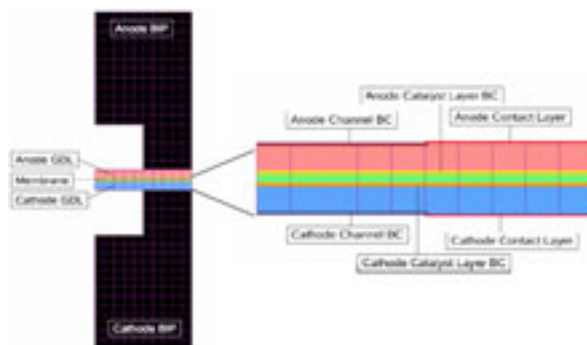
Figur 4: Mitglieder des SOF-CH Research Consortiums unter der industriellen Führung von Hexis AG und HTceramix SA [5].

Ein spannender Prozess wurde durch die beiden Firmen *Hexis AG* und *HTceramix SA* Anfang 2006 in Gang gesetzt (siehe nationale Zusammenarbeit). Mit dem Fokus: Verbesserung der Lebensdauer von SOFC-Stacks für Wärme-Kraft-Anwendungen vereinten sie wesentliche Kompetenzträger von *EMPA-HLK*, *EPFL-LENI*, *ETHZ-NIM* und *ZHW-CCP* zu einer Arbeitsgruppe und später zum

sogenannten *SOF-CH* Konsortium (siehe Fig. 4). Ausgehend von der moderat abgefassten Vision 2015: *1 MW installierte Leistung*, d.h. eintausend 1 kW Systeme zu erreichen, wurde gemeinsam eine zielführende Roadmap entwickelt. Daraus liessen sich eine Reihe von erforderlichen Workpackages im vor-kommerziellen Bereich ableiten und schliesslich priorisieren. Um die Arbeiten möglichst schnell in Gang zu bringen und dem Konsortium Gelegenheit zu geben, sich optimal aufzustellen, wurden mit dem Projekt **Enhancing the lifetime of SOFC stacks for combined heat and power applications** [5] die 3 wichtigsten Arbeitspakete: (a) Redox Stabilität von State-of-the-Art Anoden, (b) Dauerfestigkeit von Kathoden und Messung und (c) Simulation sowie Berechnung thermochemischer Eigenschaften von Komponenten in Form einer Anschubfinanzierung unterstützt. Neben der erfolgreichen Durchführung der geplanten Messungen und Simulationen (siehe Fig. 5), war es auch ein Ziel, einen Antrag bei *swisselectric Research* zu platzieren. Dieser



Figur 5: Repetitives Element eines Hexis SOFC Stacks geprüft unter externer Last. Das 3D Seses FE-Model wird verwendet um die räumlich gemittelten, mechanischen Eigenschaften zu berechnen [5].



Figur 6: Simulationsgebiet: Kleinste repetitive Einheit der Testzelle (links) und vergrößerter Ausschnitt der MEA (rechts) mit Randbedingungen [6].

wurde kurz nach dem Ende der Berichtsperiode zu einem grossen Teil angenommen und sichert vorerst den beschleunigten Fortgang der Forschungsaktivitäten in Richtung der formulierten Vision 2015.

PEFC-Brennstoffzellen

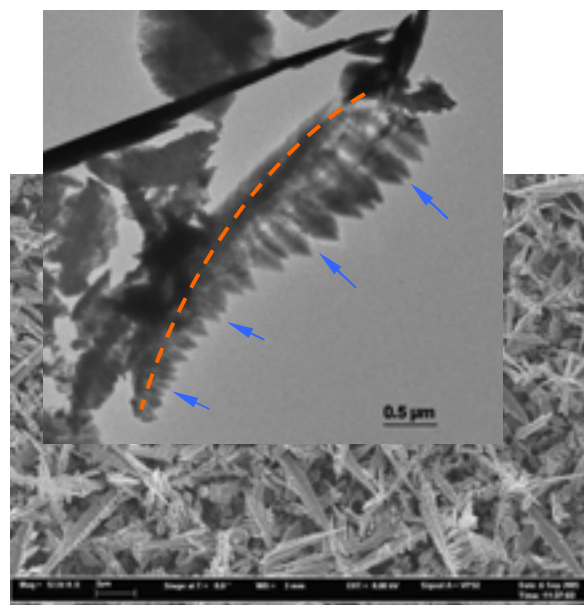
Wasserhaushalt und Temperaturverteilung sind wichtige Parameter zur Optimierung der Leistung heutiger PEFC. Die beiden gegenläufigen Prozesse, das Austrocknen der Membran beim Betrieb mit zu trockenem Oxidationsmittel (Luft oder Sauerstoff) oder hoher Temperatur, resp. das Fluten der porösen Schicht und/oder des Flussfeldes mit dem Reaktionsprodukt Wasser, reduzieren den Wirkungsgrad der PEFC. Oft existiert nur ein schmaler Bereich, der einen effizienten Betrieb gewährleistet, welcher zudem empfindlich auf äussere Einflüsse wie Laständerungen, etc. reagiert und daher die Regelung von PEFC-Stapeln aufwändig macht. Im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes von PSI und ZHW **Numerische Modellierung von PEFC, Weiterentwicklung und erste Validierung des 2D+1 Modellansatzes** [6] wurde ein vertieftes Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse angestrebt. Dazu entwickelte das PSI eine weltweit neue innovative Messmethode zur lokalen Bestimmung der Stromdichte via Potenzialmessungen. Numerische Modelle der ZHW wurden dazu verwendet, um aus gemessenen Potenzialverteilungen die Stromdichte zu eruieren (siehe Fig. 6). Der eingeschlagene Weg hat sich zur Verbesserung der Zuverlässigkeit technischer Zellen als vielversprechend erwiesen und soll fortgesetzt werden.

Zwei Schwerpunkte zur Weiterentwicklung von Polymerelektrolyt Brennstoffzellen vertiefte das PSI im Projekt **Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H_2 oder Methanol als Brennstoff** [7]. Im ersten Teil wurden folgende spezifische materialwissenschaftliche Aspekte dieser Technologie behandelt: (i) die grundlegende Elektrochemie von Platin (Pt) in Kontakt zu einem Festelektrolyten, mit Aspekten der Pt-Einsparung zur kostengünstigeren Gestaltung von Membran-Elektroden-Einheiten und die Charakterisierung im Hinblick auf deren Alterung, (ii) die Entwicklung von Pt-freien oder Pt-armen Katalysatoren für die Sauerstoffreduktion auf der Basis von Oxiden und (iii) die Entwicklung von kostengünstigen protonenleitenden Polymerelektrolyten auf der Basis strahlengepfropfter Filme und deren anschliessender Sulfonierung zur Einführung von Protonenleitfähigkeit. Der zweite Teil des Projektes beschäftigt sich mit der Entwicklung von in situ diagnostischen Methoden für PEFC. Die Methode der Neutronenradiographie zur Visualisierung und Quantifizierung von flüssigem Wasser in PEFC wurde weiter entwickelt. In Kombination mit ortsaufgelösten Impedanzmessungen konnten erstmalig Ergebnisse

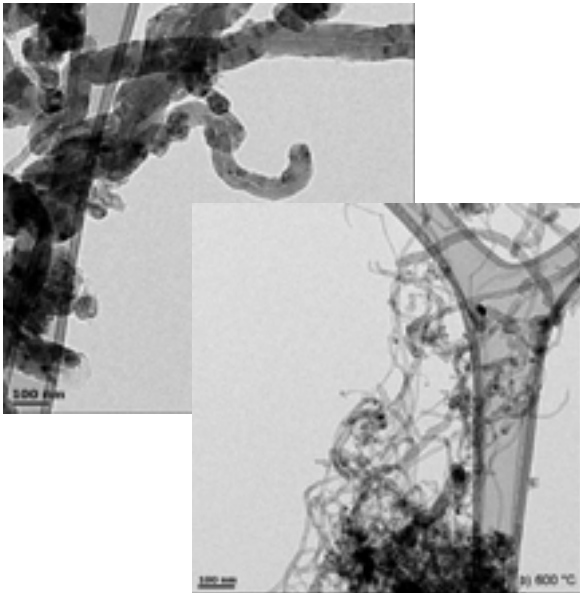
dieser beiden kombinierten Methoden vorgestellt werden. Weiterhin konnte ebenfalls erstmalig eine pseudo-Referenzelektrode in eine PEFC eingeführt werden, die die Bestimmung von Einzelelektroden-Impedanzen der Anode und Kathode erlauben und damit auch die Ermittlung kinetischer Daten sowohl für die Wasserstoff Oxidations- als auch der Sauerstoff Reduktionsreaktion.

Protonenleitende Polymerelektrolyten, präpariert durch die Methode der Strahlungsproffung, sind als kostengünstige Alternative zu kommerziellen Membranen interessant. Ziel des gegen Ende des Berichtsjahres gestarteten PSI-Projekts **Protonenleitende Polymerelektrolyten für Brennstoff- und Elektrolysezellen** [8] ist die Optimierung der für den Betrieb in Brennstoff- und Elektrolysezellen notwendigen Eigenschaften dieser Polymerelektrolyten im Hinblick auf ihre Anwendung als Festelektrolyte. Die Arbeiten sind eine Fortsetzung der im Projekt [7] gestarteten Untersuchungen und visieren eine Erhöhung der Standzeiten der Membran in Brennstoffzellen bei erhöhten Temperaturen von ca. 80°C unter zyklischen Bedingungen an.

Bei der Optimierung der Platinbelegung an der Grenzfläche Elektrode - polymerer Festelektrolyt ist ein besseres Verständnis der grundlegenden Pt- und Pt-Nanopartikel-Elektrochemie nötig. Die kinetischen Prozesse der H-Adsorption an Pt im Unterpotentialbereich, besonders zur Charakterisierung der elektrochemisch aktiven Fläche in Brennstoffzellenelektroden, wurden weiter untersucht. Dabei konnte eine bisher unbekannte Federstruktur von Pt [9] festgestellt werden (siehe Fig. 7).



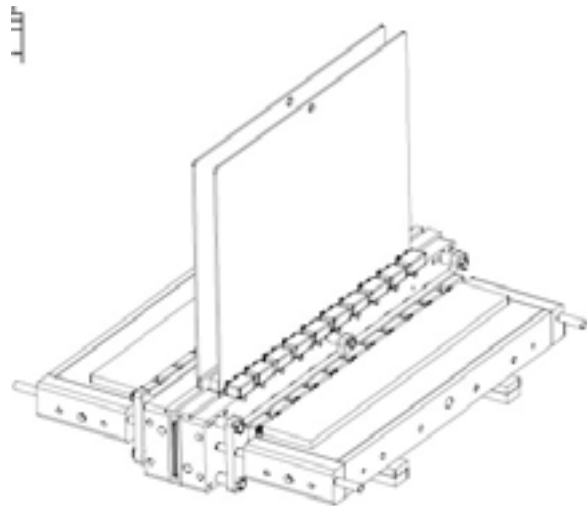
Figur 7: Rasterelektronische (unten) und transmissionselektronische (oben) Aufnahme der bisher unbekannten Federstruktur von Platin [7, 9].



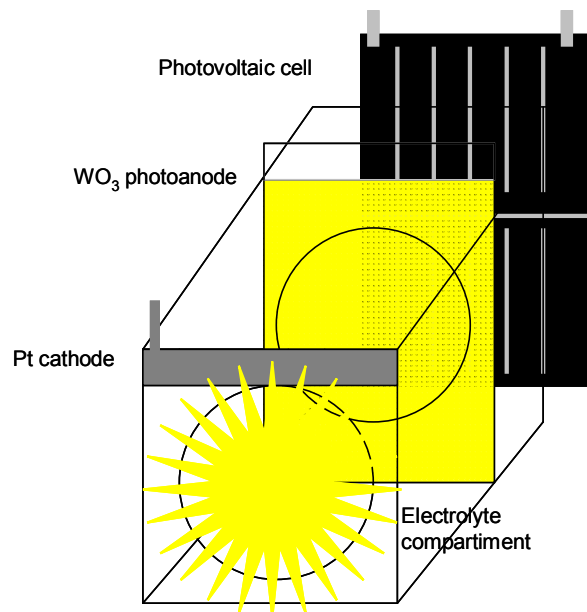
Figur 8:. TEM-Bilder der MWCNTs (MWCNTs = Multi Wall Carbon Nanotubes), hergestellt bei a) 800°C (links oben) und b) 600°C (rechts unten) [10].

Herkömmliche Elektrodenmaterialien wie Platin auf aktiviertem Kohlenstoff führen zu Überspannungen bei der Sauerstoffreduktion in Zn/Luft-Batterien und Brennstoffzellen. Im neu gestarteten Projekt **New Highly Active Oxygen Reduction Electrode for PEM Fuel Cells and Zn/Air Battery Application (NORA)** [10] soll ein Elektrodenmaterial, basierend auf carbon nanotubes (CNT) und Perovskiten, entwickelt werden, das diese Überspannungen drastisch senkt. Sauerstoff- und OH-Bindungsenergien des Katalysators sind entscheidend für die katalytische Aktivität. Perovskite haben eine hohe Sauerstoffbedeckung an der Oberfläche und eine bedeckungsabhängige Sauerstoffbindungsenergie. Das Projekt strebt eine um 30% höhere Effizienz als herkömmliche Elektroden an. Ziel des ersten Projektjahres ist die Herstellung eines ersten CNT/Perovskit-Kompositen (sogenannte MWCNTs = Multi Wall Carbon Nanotubes, siehe Fig. 8) und die Untersuchung dessen Stabilitätsbedingungen.

Präzise Gasanalysen sind wichtig für die Weiterentwicklung von Brennstoffzellen. Im neu gestarteten Projekt **Lokale Gasphasenanalyse an PE-Brennstoffzellen** [11] ist ein neuer Teststand mit einem Massenspektrometer als Kernkomponente aufgebaut und erste Messungen mit Laborluft durchgeführt worden. Demnächst werden die Gasentnahme komplettiert und Kalibrationsmessungen durchgeführt, so dass erste Messungen an den Modellbrennstoffzellen stattfinden können (siehe Fig. 9).



Figur 9: Modellbrennstoffzelle zur lokalen Gasanalyse [11].



Figur 10: Tandem PEC Zelle angewendet zur H_2 -Herstellung durch Wasserspaltung mit in diesem Fall simuliertem Sonnenlicht [12,13].

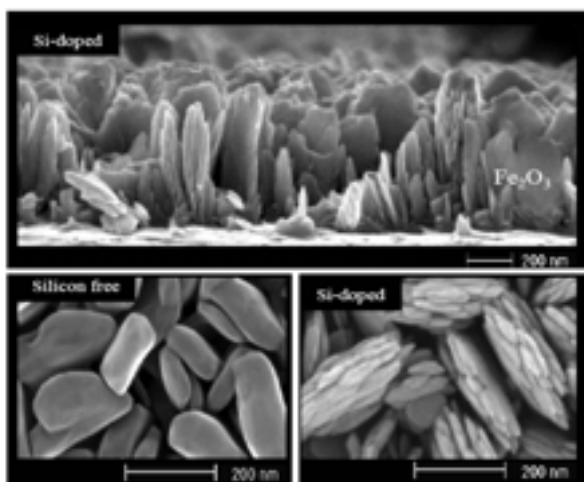
WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

H_2 -Produktion

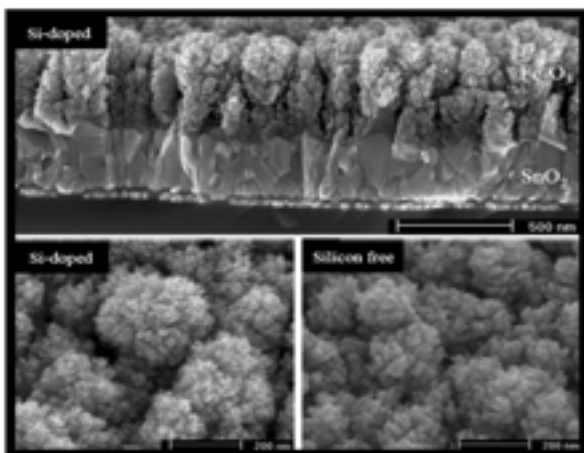
Im langjährigen Projekt **Photolyse de l'eau et production d'hydrogène au moyen de l'énergie solaire** [12,13] geht es um die direkte Wasserspaltung durch das Sonnenlicht in einer Tandemzelle (siehe Fig. 10). In enger Zusammenarbeit wird an der Universität Genf und an der ETH-Lausanne insbesondere an der Optimierung verschiedener Anodematerialien gearbeitet. Die Photoanode oxidiert Wasser. Als Kathode dient vorderhand Platin zur Wasserspaltreaktion, unterstützt durch eine leichte Spannungserhöhung mittels Farbstoffphotovoltaikzelle.

Die Arbeiten an der Universität Genf konzentrierten sich im Berichtsjahr auf die Optimierung

des Elektrolyten zwischen der WO_3 -Photoanode und der Pt-Kathode sowie auf die Stabilitätseigenschaften der Anode bei der Verwendung verschiedener Elektrolyten. Entgegen der bisherigen vorherrschenden Meinung konnte gezeigt werden, dass nicht die Elektronendiffusion durch die Halbleitermatrix das Photostrom-Spannungsverhalten kontrolliert, sondern die Migrations-/Diffusions- und Transportphänomene im Elektrolyten, der die Poren der Photoelektrode füllt [14]. Die wichtigen Parameter bei der Verwendung dicker, nanostrukturierter Elektroden sind die Eindringtiefe des einfallenden Lichtes, die Diffusions-/Migrationsraten elektroaktiver Ionen in der Elektrode und insbesondere die Leitfähigkeit des Elektrolyten.



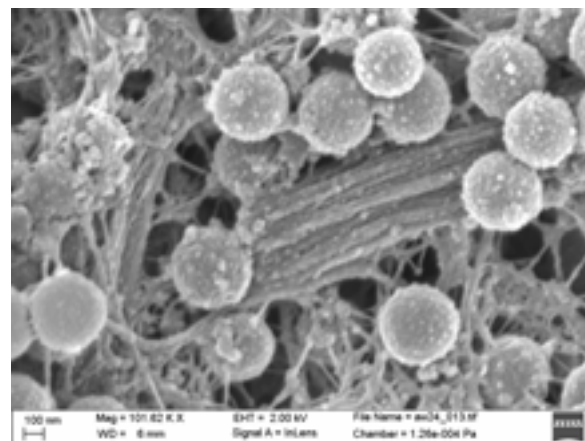
Figur 11: Morphologie von undotierten und durch Ultraschallspray Pyrolyse (USP) siliziumdotierten Fe_2O_3 -Photoanoden. Si-Dotierung und ein Depositionsverfahren welches eine möglichst grosse Gesamtoberfläche erzeugt sind massgebend für eine signifikante Effizienzsteigerung [13].



Figur 12: Morphologie von durch atmosphärische chemische Dampfdeposition (APCVD) siliziumdotierten und undotierten Fe_2O_3 -Photoanoden. Das angewendete Verfahren führt zu einer stark vergrösserten aktiven Oberfläche damit zu einer deutlichen Effizienzsteigerung [13].

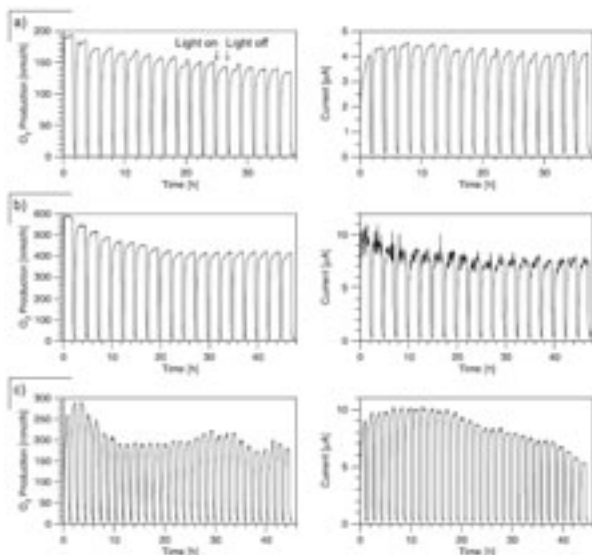
Da die Lichtausbeute der an der WO_3 -Photoanode der Universität Genf nicht optimal ist, wird seit einigen Jahren im Projekt **Photolyse de l'eau et production d'hydrogène au moyen de l'énergie solaire** [13] an der ETH-Lausanne das vielversprechende Material Fe_2O_3 (Hämatit) als Photoanode untersucht. Im Berichtsjahr wurde ein neues Depositionsverfahren von nanokristallinen Fe_2O_3 -Filmen Fig. 11 und Fig. 12 auf die Anode entwickelt und dadurch eine unerwartet hohe Effizienz erreicht. Eine weitere Effizienzsteigerung brachte die Deposition von Kobalt Monolayers auf die Hämatit-Anode, welche eine katalytische Wirkung auf die Wasseroxydation hat. Des Weiteren wurde durch Verwendung von Zinkverbindungen die Lichtausbeute im infrarotnahen Lichtspektrumsbereich verbessert.

Im neu gestarteten Projekt **NEFIOS-Hydro** [15] werden an der Uni Basel und an der Fachhochschule Nordwestschweiz im Zusammenhang mit dem Projekt [12] der Universität Genf verschiedene Ansätze zur Synthese von neuartigen, leitenden nanokristallinen Oberflächen untersucht. Um eine möglichst effiziente Wasserspaltung durch Sonnenstrahlung zu erzielen, müssen die Oberflächen nicht nur transparent sein, sondern auch eine möglichst grosse Gesamtoberfläche aufweisen. Als erfolgversprechende Kandidaten werden Kombinationen von Silica-Nanopartikeln und Kohlenstoff-Nanoröhrchen untersucht (siehe Fig. 13).



Figur 13: REM Bild von Silica-Nanopartikeln kombiniert mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen [15].

Ziel der langjährigen Forschungsaktivitäten zum Thema **Photochemische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie** ist die Photoelektrochemische Wasserspaltung mit sensibilisiertem Ag/AgCl als Photoanode und einer Halbleiter-Photokathode. Vorderhand wurde eine Platinelektrode in der Halbzelle für die H_2 -Produktion benutzt. An der Universität Bern wurde der Nachweis erbracht, dass durch die Verwendung

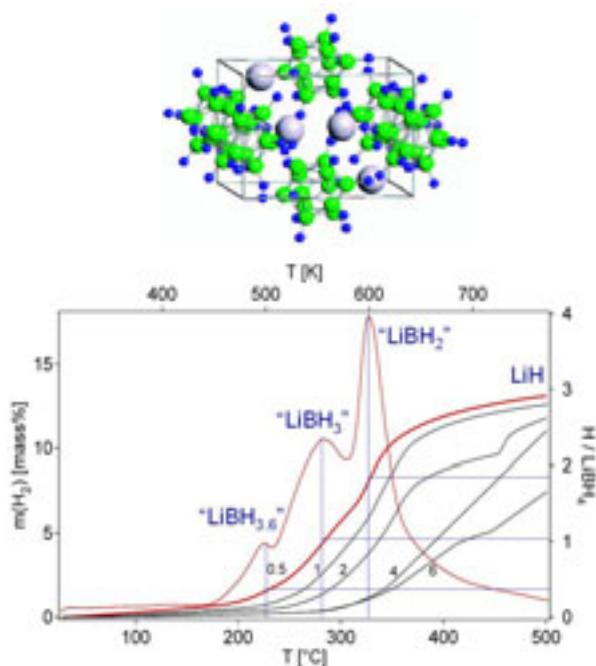


Figur 14: O_2 -Produktion und Photostrom versus Zeit für drei verschiedene Photoanoden. a) AgCl-Elektrode, b) Zeolith-A-Monoschicht modifiziert mit AgCl, c) Zeolith-L-Monoschicht modifiziert mit AgCl [16].

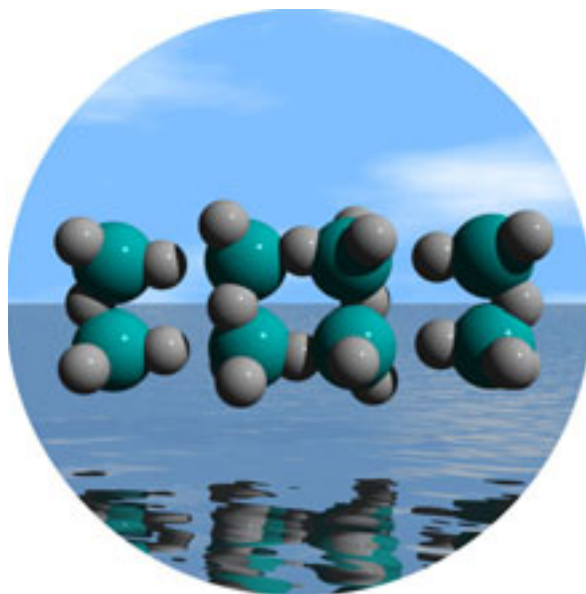
von nanoporösen Materialien als Trägermaterial die Effizienz der AgCl-Photoanode erhöht werden kann [16]. Fig. 14 zeigt die Sauerstoff Produktion und den Photostrom gegen die Zeit für drei verschiedene Photoanoden. Für eine gewöhnliche AgCl-Photoanode liegt die O_2 -Produktion bei ca. 160 nmol/h und der Photostrom bei ca. 4 μA . Wird eine Zeolith-A-Monoschicht auf einer leitenden Goldschicht als Trägermaterial für die AgCl-Photoanode verwendet, so erhält man eine mittlere Sauerstoff Produktion von ca. 400 nmol/h und einen Photostrom von ca. 9 μA . Wird eine Zeolith-L-Monoschicht als Trägermaterial verwendet, so ist die Erhöhung der Sauerstoff-Produktion und des Photostroms etwas kleiner (ca. 220 nmol/h bzw. ca. 7 μA). Auf Grund dieser Ergebnisse wird nun der Einfluss von mesoporösen Materialien oder Membranen auf die Effizienz der AgCl-Photoanode untersucht, wenn diese als Matrix für das AgCl verwendet werden.

H₂-Speicherung

Im Projekt **Wasserstoffspeicherung in Metall- und komplexen Hydriden** [17] geht es um die Definition und Analyse neuer Materialien. Potentielle Kandidaten wie $LiBH_4$, weisen eine volumetrische Wasserstoffdichte von $> 120 \text{ kg H}_2 \text{ m}^{-3}$ und eine gravimetrische Wasserstoffdichte von $> 8 \text{ Massen-\%}$ auf, womit dieses Hydrid die grösste bekannte gravimetrische Wasserstoffdichte erreicht. Die physikalischen Eigenschaften sind jedoch weitgehend unbekannt. Die Struktur und die Wasserstoffsorptionseigenschaften von $LiBH_4$ sind im Rahmen des Projekts geklärt worden. Ziele des Berichtsjahres war die Oberflächenanalyse der komplexen Hydride und die Untersu-



Figur 15: Thermische Desorptionsspektroskopie an $LiBH_4$ (unten) und der metastabile Cluster bestehend aus Li, B und H (oben) [17].



Figur 16: Dinukleare $[Ni_2H_7]^-$ - (Ränder) und tetranukleare $[Ni_4H_{12}]^{12-}$ -Komplexe (Zentrum) in $La_2MgNi_2H_8$ (die Ni-Atome sind gross, die H-Atome klein dargestellt) [18].

chung des Mechanismus der Wasserstoffdesorption hinsichtlich möglicher Zwischenstufen.

In theoretischen Modellrechnungen konnten Zwischenprodukte identifiziert werden, welche eine grössere Stabilität als die Endprodukte (siehe Fig. 15) haben. Experimentell wurden mit dem umgebauten Photoelektronenspektrometer (Einschleusen durch Ar-Kammer, Temperaturkontrolle der

Probe, Massenspektrometer) während der Wasserstoffdesorption die Oberflächenzusammensetzung untersucht und gleichzeitig mit dem Massenspektrometer die desorbierten Spezies identifiziert. Dabei wurde festgestellt, dass nicht nur Wasserstoff sondern auch Verbindungen von der Art $(\text{BH}_3)_n$ desorbiert werden. Der Desorptionsmechanismus im Hochvakuum scheint grundsätzlich anders zu sein als unter Wasserstoffatmosphäre. Eine neue Sorptionsanalyseanlage mit einem Systemvolumen von nur noch 2 cm^3 wurde entwickelt und gebaut. Zudem ist die Anlage im Endausbau vollständig digitalisiert, wodurch die Genauigkeit der Druck- und Massenflussmessung signifikant gesteigert werden konnte.

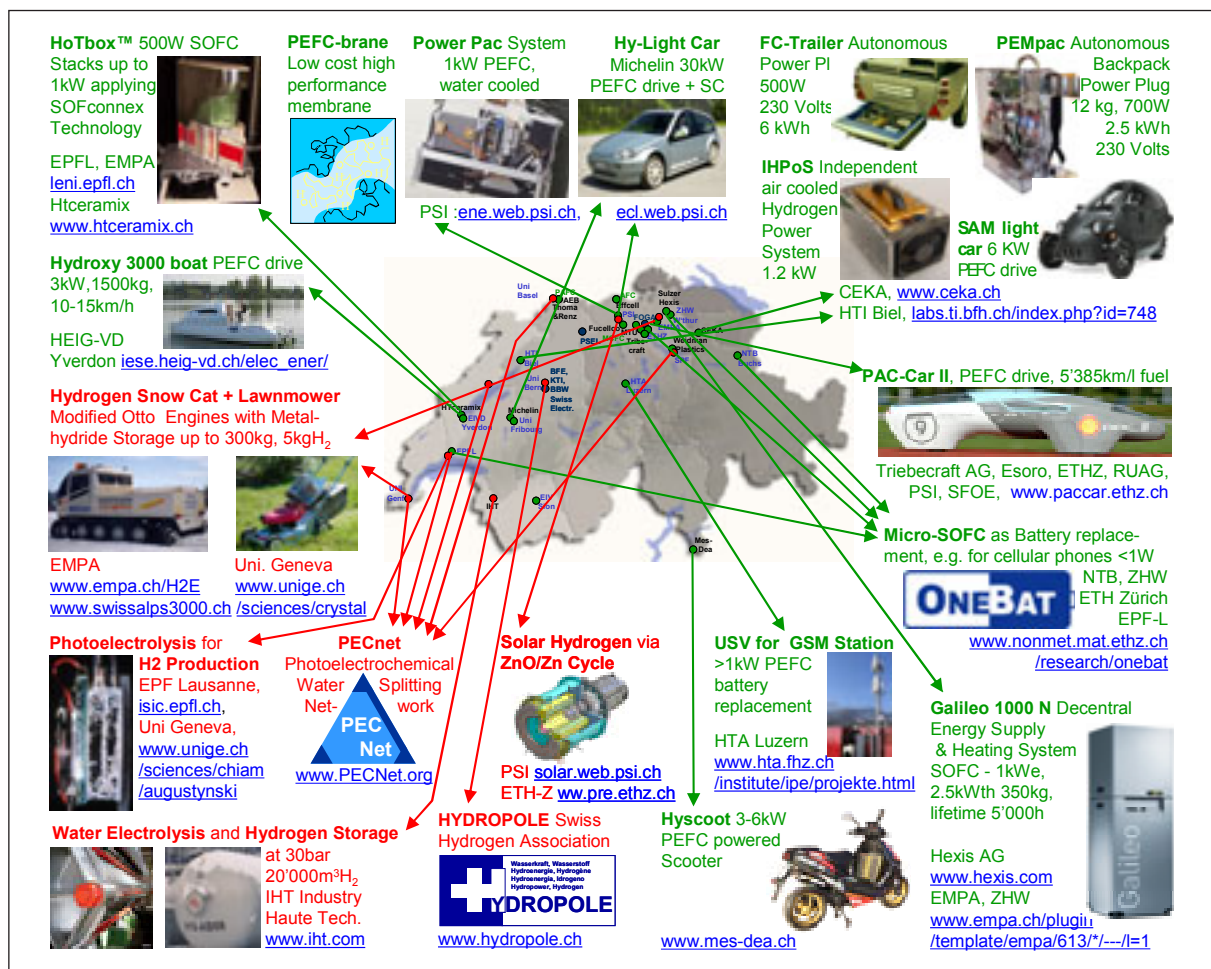
Festkörpermetallhydride sind kompakte und sichere Wasserstoffspeicher. Im Projekt **New metal hydrides for hydrogen storage in fuel cell**

systems [18] werden an der Universität Genf systematisch nach Hydriden mit höchster Speicherdichte gesucht. Vielversprechende Kandidaten sind d- und p-Metallhydridkomplexe. Der Komplex Mg_2FeH_6 konnte mit einer Ausbeute von 91% erzeugt werden, ein neuer Rekord im Vergleich zu früher erreichten Ausbeuten von 80%. Der Komplex MgMnH_9 ist ein Kandidat mit sehr hoher Wasserstoff-Speicherdichte. Seine Herstellung gelingt aber nur durch besseres Verständnis ähnlicher, jedoch thermodynamisch stabilerer Komplexe. Im Berichtsjahr wurde die Dynamik des Komplexes BaReH_9 mit der Neutronenstreuung untersucht, um die Stabilität von MgMnH_9 besser zu verstehen. Ausserdem konnte der Komplex $\text{La}_2\text{MgNi}_2\text{H}_8$ hergestellt und betreffend Struktur (siehe Fig. 16) und Eigenschaften charakterisiert werden.

Nationale Zusammenarbeit

Im ganzen Programmbereich kann auf eine der allgemeinen Stärken der Schweiz, nämlich die sehr gute Vernetzung unter den Akteuren, gezählt werden. Die diesbezüglichen Anstrengungen dürfen jedoch nicht vermindert werden. Daher wurde der

Überblick der Schweizerischen Brennstoffzellen- und Wasserstoffforschung-Community ständig aktualisiert (siehe Fig. 17) und wird im Jahr 2007 auf Internet aufgeschaltet.



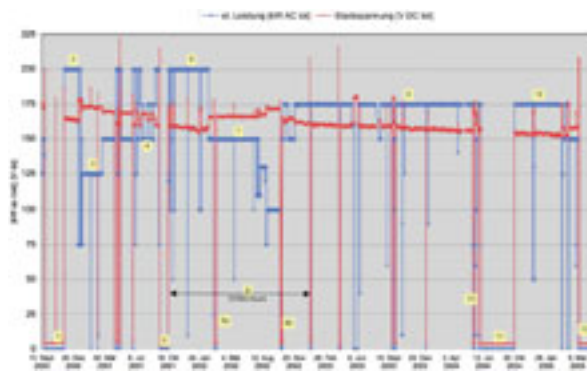
BRENNSTOFFZELLENTESCHNOLOGIE

Neben der erfolgreichen Lancierung des oben beschriebenen *SOF-CH* Netzwerkes als vor-kommerzielles Forschungskonsortium und der schon längeren guten Zusammenarbeit im **ONEBAT**-Verbund-Projekt hat auch im PEFC-Bereich ein guter Austausch unter den Akteuren stattgefunden. Einerseits haben die beiden Firmen *Ceka AG* und *MesDea SA* diverse Gespräche über den gemeinsamen Forschungsfokus miteinander geführt, andererseits konnten dank starker Präsenz des PSI sowohl im Modelling als auch im Testingbereich sehr vielversprechende Kooperationen und Dialoge über den Abgleich der Ziele initiiert werden. Es ist aber noch nicht gelungen aus dem Strauss der vorgeschlagenen Projekte ein fokussiertes Projekt mit abgestimmten Zielen und vernetzten Arbeitspaketen zu gestalten.

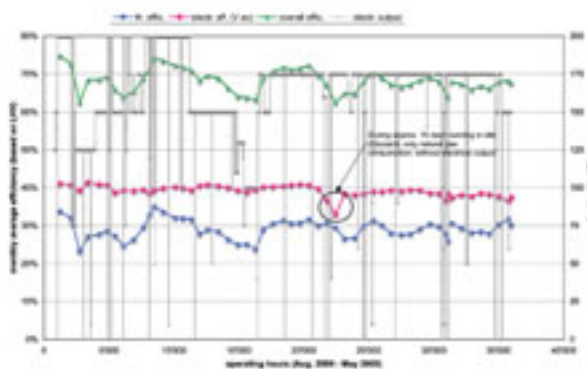
Die Neu-Gründung der *Hexis AG* wurde durch eine Winterthurer Stiftung ermöglicht. Dies gestattet die unabhängige Weiterführung der, während den letzten 15 Jahren auch mit namhaften Mitteln der öffentlichen Hand aufgebauten, hohen Kompetenz und Forschungsarbeit im SOFC-Bereich der ehemaligen *Sulzer Hexis AG*. Das Inventar und die Rechte sowie ein Teil der *Hexis*-Mannschaft wurden übernommen. Mit dem, den realen Verhältnissen angepassten, Business Plan wird nun ein neues, auch von Zusammenarbeit geprägtes Kapitel in dem noch forschungsabhängigen Industrialisierungsprozess geschrieben.

Bereits im Sommer 2005 erreichte die durch die *AEB Alternativ-Energie Birsfelden AG* (lokaler privater Fernwärmeversorger) betriebene stationäre 200 kW_{el} Brennstoffzelle vom Typ ONSI PC 25 C (PAFC) ihr 5-jähriges Betriebsjubiläum. Die Demonstrationsanlage ist auf einem Schulhof in Birsfelden und in unmittelbarer Nähe zu einem Einkaufszentrum aufgestellt und damit täglich für zahlreiche Passanten ersichtlich. Der Strom wird ins Netz des lokalen Stromversorgers und die Wärme ins Fernwärmenetz der *AEB* gespeist. Die Anlage lief in dieser Zeit ohne grössere Reparaturen und konnte vorwiegend durch einen lokalen Energiedienstleister gewartet werden. Insgesamt absolvierte die Anlage 36'000 Betriebsstunden (Fig. 18) mit einem gemittelten elektrischen Wirkungsgrad von über 39 % (berechnet aus der netto nutzbaren Strommenge und der eingesetzten Erdgasmenge, siehe Fig. 19).

Jedoch war es zu keinem Zeitpunkt gelungen, mehr als 60% der von der Brennstoffzelle produzierten thermischen Energie zu nutzen, was zu einer beträchtlichen finanziellen Einbusse führte. Seit Sommer 2005 traten diverse, ungeklärte, technische Probleme auf. Da auf der Herstellerseite keine deutlichen Kostensenkungen eingetreten sind und die Reparaturanfälligkeit mit zunehmender Alterung ansteigt, bedeutet eine



Figur 18: Leistungs- (Stufen) und Spannungsverlauf (variable Kurve) der ONSI-Zelle über die ganze Betriebszeit von 36'000 h [28].



Figur 19: Thermischer (unten), elektrischer (mitte) und overall (oben) Wirkungsgrad sowie elektrische (Stufen) Leistung der ONSI-Zelle über die ganze Betriebszeit 36'000 h [28].

Fortsetzung des Betriebs weitere unplanbare finanzielle Risiken. All dies und die ungenügenden Zukunftsperspektiven und Abdeckung der finanziellen Risiken führten dazu, den Weiterbetrieb der Brennstoffzelle mit eigenen Mitteln einzustellen. Zusammengefasst wurden diese Ergebnisse von *THOMA+RENN* im **Erfahrungsbericht über 5 Jahre Betrieb der Brennstoffzelle vom Typ ONSI in Birsfelden** [28].

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Der Austausch und die Transparenz innerhalb der relativ kleinen, international anerkannten Wasserstoff-Gemeinschaft in der Schweiz sind gut. Zudem hat sie im Wasserstoff-Verein *Hydropole* (www.hydropole.ch) einen gewissen kleinsten gemeinsamen Nenner. Bemerkenswert bei den *Hydropole*-Aktivitäten sind folgende Outputs: 1) Erstellung des Hydrogen Report Switzerland [29], 2) Organisation und Durchführung eines *Village Suisse* an der *World Hydrogen Energy Conference WHEC* 2006, 3) aktive Industriebeteiligung an den Vereinsaktivitäten (*Weka*, *Bieri*, *IHT*) 4) fruchtbare Industrie-Kontakte, welche u.a. zu einem KTI Projekt führte.

Eine besonders zukunftsweisende Nachricht ist die Gründung der *Abteilung Wasserstoff und Energie* an der EMPA unter der Führung von Prof. Andreas Züttel [17]. Neben der Lehre sind folgende Schwerpunkte in der Forschung hervorzuheben: 1) Struktur und Dynamik von Metall-Hydriden, 2) Thermodynamik von Metall-Hydriden und 3) weitere Aspekte von Metall-Hydriden wie theoretische Modelle (DFT, Phonon), Elektrochemie, Konstruktion und Sicherheit.

Im Bereich der Photovoltaik (PV) und insbesondere der photoelektrochemischen Wasserspaltung (PEC) bestehen in der Schweiz international führende Kompetenzen, die sich mit den Pensionie-

rungen der Professoren Augustynski (Uni Genf) und Calzaferri (Uni Bern) in Umbruch befinden. Im Wissens- und Technologie-Transfer-Projekt **PECNet Aufbau eines Schweizer Kompetenznetzwerkes für die solare Wasserspaltung mittels hybrider PV-PEC Zellen** [30] ist es das Ziel, diese Kompetenzen zu bündeln, interdisziplinär und umsetzungsorientiert mit der Industrie zu vernetzen und erfolgreich auf eine von EU-FP7 getragene internationale Weiterarbeit zu fokussieren (siehe auch Fig. 19). Bisher ist PECNet sowohl national als auch international auf sehr positives Echo gestossen und im Jahr 2007 sind wesentliche Durchbrüche zu erwarten.

Internationale Zusammenarbeit

Im **IEA Programm Advanced Fuel Cells (AFC)** nimmt die Schweiz in den Annexen XIX [31] und XVIII [32] teil. An den beiden AFC-ExCo standen der Beitritt der Türkei und von Mexiko, die Statusberichte der Annexe XVI – XXI, welche im Jahr 2008 ablaufen und neu diskutiert werden, sowie das globale Projekt FCTESTNET (Zusammenarbeit zwischen EU, IEA und IPHE) im Vordergrund. Dabei wurde festgestellt, dass der Informationsaustausch zwischen EU- und IEA-Programmen funktioniert und somit Doppelspurigkeiten vermieden werden. AFC-seitig ist eine Informationsbroschüre geplant, um weitere Mitglieder – im Fokus sind China, Russland, Indien, Südafrika und Brasilien – zu gewinnen. Der neue AFC-Webauftritt ist inzwischen unter www.ieafuelcell.com aufgeschaltet. Die Akteure in der Schweiz werden regelmässig über die neusten Entwicklungen im IEA-ExCo informiert.

Im **Annex XIX Stationary Fuel Cells** stehen die Rahmenbedingungen und Möglichkeiten für den Markteinstieg von Brennstoffzellen für stationäre Anwendungen im Vordergrund. Sowohl die Eigenschaften (Marktleistungen) und der Entwicklungsstand der Brennstoffzellen als auch die Anforderungen der Zielmärkte, respektive die Marktbedürfnisse werden unter die Lupe genommen. Zudem werden die Möglichkeiten zur Vereinheitlichung der peripheren Anlagekomponenten (Balance of Plant) untersucht und der internationale Stand der Brennstoffzellenentwicklung verfolgt. Die Schweiz leitet die **Subtask 1 Market Outlook** [31]. Interessante Zwischenergebnisse sind: Dem dezentralen Einsatz von (kleinen) Brennstoffzellen für Strom- und Wärmenutzung stehen die sehr unterschiedlichen Strukturen von Strom- und Wärmemarkt gegenüber. Der Strommarkt wird angebotsorientiert von einigen wenigen Unternehmen dominiert, wogegen der Wärmemarkt sehr heterogen und nachfrageorientiert funktioniert. Daraus entstehen konträre Interessen und Bedürfnisse der Marktteilnehmer. In Europa treten immer wie-

der neue Konsortien mit eigenen Entwicklungen von kleinen Brennstoffzellen (PEFC, SOFC) auf. Diese werden durch regionale Förderprogramme angetrieben. Die damit entstehende Diversität hemmt jedoch die Vereinheitlichung und damit Kostenreduktion der peripheren Anlagekomponenten. Die Arbeitsgruppe musste feststellen, dass bei den europäischen Entwicklern nur ein geringes Interesse an der Standardisierung und gemeinsamen Kooperation mit Komponentenlieferanten besteht. Damit fehlen auch die Anreize für die Komponentenhersteller, sich stärker für die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen zu engagieren. In den USA wurde die Entwicklung der Brennstoffzellen durch Förderprogramme des Bundes (SECA) auf die Entwicklung von 5kW SOFC fokussiert. Dies hat auch den Einstieg von bisher im Brennstoffzellengebiet wenig aktiven Grossfirmen beschleunigt. In Japan fokussiert sich die Entwicklung im stationären Bereich auf die PEFC. In einem koordinierten Demonstrationsprogramm wurden bisher über 1000 Anlagen von verschiedenen Herstellern installiert. Die weiteren Entwicklungsschritte umfassen eine strukturierte Selektion und Einbindung von Zulieferern. Bei den Grossanlagen (100 – 1000 kW) dominieren zur Zeit die MCFC. Das in Deutschland entwickelte *Hot Modul* mit einer 250 kW MCFC wird neu mit einem in Europa entwickelten Stack bestückt. In zahlreichen Demonstrationsanlagen wurden Nutzungsdauern von über 20'000 Stunden erreicht. Keine marktrelevanten Fortschritte sind bei den grossen SOFC erkennbar.

Hauptereignis im **Annex XVIII (SOFC)** [32] war der Helsinki-Workshop [34]. Er diente als Netzwerk-Forum für die Schweizer SOFC-Community. Festgestellt wurde, dass die USA, Japan und die EU als starke Konkurrenten die weltweite SOFC-Szene beherrschen. Jedoch nehmen die US- und J-Budgets stärker zu als die im 7. RP der EU vorgesehenen SOFC-Budgets. Ferner sind Korea und China daran, punkto F&E aufzuholen. In die-

sem Projekt werden auch die Schweizer Interessen an der HFP-Plattform in Brüssel wahrgenommen. Festgestellt wurde, dass mehr Lobby-Aktivität seitens der CH-Industriepartner nötig ist.

Im **Hydrogen Implementing Agreement (HIA)** der **IEA** (www.ieahia.org) ist die Schweiz auf breiter Basis der Grundlagenforschung aktiv, dies dank der Weitsicht des BFE schon seit der Gründungszeit der HIA im Jahre 1977. Die Mitgliederzahl des HIA wächst stetig und betrug im Jahre 2006 neunzehn Länder. Das HIA zeichnet sich vor allem aus durch weltumspannende Koordination von Forschungsaufgaben im vor-kommerziellen Stadium. Die *Hydrogen Coordination Group (HCG)* der IEA wurde vom HIA umfassend beraten, was im Jahre 2006 zu entsprechenden Positionspapieren geführt hatte. Die Mitarbeit durch Schweizer Expertengruppen betrifft derzeit insbesondere die Gebiete:

- Niedertemperatur-Wasserspaltung durch direkte Solarbestrahlung
Annex-20: Hydrogen from Waterphotolysis; Universitäten Basel, Bern, Genf und EPFL
Das Management von Annex-20 ist weiterhin in Schweizer Hand.
- Hochtemperatur Wasserstoff-Produktion, wofür Vorbereitungen im Gange sind zum Start eines **neuen Annex:** High Temperature Production of Hydrogen mit Schweizer Expertenbeteiligung durch das PSI.
- Energiespeicherung mittels Metallhydriden
Annex-22: Fundamental and Applied Hydrogen Storage Materials Development; EMPA und Universität Genf).
- Executive Committee
Das **ExCo** der HIA wird sich 2007 in der Schweiz treffen.

Die Schlüsselpunkte im **HFP EU-Strategie-Programm** [35] sind: - die Notwendigkeit eines hoch fokussierten Zehnjahres-Forschungsprogramms, um u. a. die Brennstoffzellen-Systemkosten um einen Faktor zehn zu senken und die Leistungs- und Dauerhaftigkeit von BZ-Systemen zu verdoppeln. Um diese Ziele zu erreichen, sollen EU-weit nicht nur die öffentlichen und privaten, sondern auch die regionalen Ressourcen koordiniert und gebündelt innerhalb der Joint Technology Initiative (JTI) eingesetzt werden. Einige Schweizer Brennstoffzellen Firmen sind daran sich an den JTI zu beteiligen und in den entsprechenden Gremien Einsitz nehmen zu können. Um die Aktivitäten von HFP insgesamt beobachten zu können, nimmt das BFE aktiv an der HFP Mirror Group teil.

Etwas passiver ist die Beobachtung des Arbeitsfortschritts von **HYCO-Eranet** www.hy-co-era.net. Hier wäre eine Beteiligung im Network-Commis-

tee und in einigen der Action Groups (2, 3, 4, 5) wünschenswert, jedoch sind die entsprechenden Ressourcen hierfür z.Z. nicht vorhanden.

Sehr erfreulich ist auch in dieser Berichtsperiode die Beteiligung der Schweiz an EU-Projekten. Schweizer Forscher und Industriepartner sind u.a. in folgenden Projekten involviert: **NESSHY** (EU IP FP6 Novel Efficient Solid H₂ Storage Energy System, UniFR), **EU-SOLZINC** (300kW Solar Reactor Carbothermic ZnO/Zn Cycle: ZIRRUS, PSI, ETH, WIS, CNRS, ScanArc), **EU-STREP** (EU-FP6, Water vapour electrolysis, high temperature H₂ production based on SOFC Technology, EMPA), **Real SOFC** (EU-IP FP6, Durability+Lifetime of SOFC cells and stacks *HTceramix*, EMPA, ETHZ, EPFL), **FlameSOFC** (EU-IP FP6, 2 kWel micro-CHP system, *HTceramix*, EMPA), **SOFC600** (EU-IP FP6, SOFC Stack at 600°C, EMPA), **GenFC** (EU-STREP, EMPA).

In **FCTESTNET** werden weltweit die Testprozeduren von Brennstoffzellen auf ihre Praxistauglichkeit durchleuchtet. Der Schlussbericht soll anlässlich des Workshops (September 2007) über Degradationsphänomene von Brennstoffzellen vorgestellt werden. Das LPI beendete im Berichtsjahr seine Verpflichtungen [36] in den EU-Programmen **FCTESTNET** (standardisierte Testprotokolle für alle Typen von Brennstoffzellen und Technisches Glossar der Brennstoffzellentechnologie) und **SOFCNET** (Schulung und Demonstration der SOFC-Technologie). Im Rahmen von **SOFCNET** war das LPI behilflich bei der Organisation der Sommerschule 2006 in Lemnos (GR) [37].

Das BFE hat 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 2006** an welchem der Vizedirektor des BFE, M. Kaufmann, die Eröffnungsrede gehalten hat. Parallel zum Forum organisierte die britische Botschaft einen halbtägigen Anlass zum Informationsaustausch zwischen schweizerischen, britischen und französischen Forumsteilnehmern. Mehr als 40 Akteure nahmen am Anlass teil, wodurch über 60 Treffen und 5 spontane Partnerschaften zustande kamen.

Die im Jahr 2004 vom BFE gestartete Symposiensreihe mit internationaler Beteiligung **Fuel Cell Research Symposium Modelling and Experimental Validation** wurde an der EMPA in Dübendorf wie üblich im März mit Erfolg fortgesetzt. 2007 wird das Symposium vom FZ-Jülich, 2008 von der ZHW Winterthur und 2009 voraussichtlich von einem Institut in Österreich (Leoben) organisiert [38-42]. Dies zeigt, dass in diesem Bereich eine breite internationale Trägerschaft gefunden werden konnte. Neben fachlichen Vorträgen fin-

det an diesem Symposium auch ein intensives Networking statt, welches als Nährboden für Kooperationen und auch EU-FP7 Projekt Eingaben dient. Im Programm wird jeweils auch Platz für

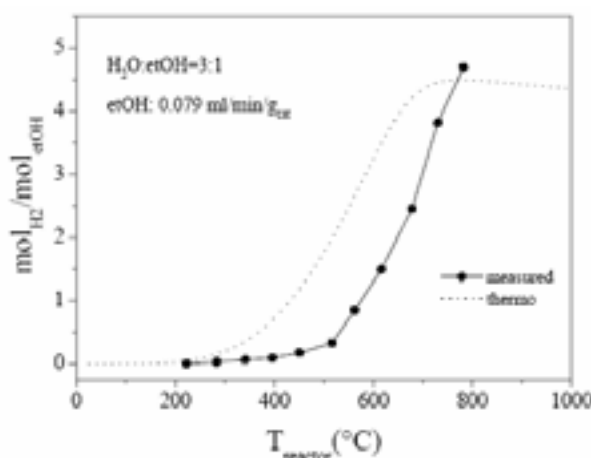
eine Panel-Diskussion eingeräumt um das bisher Erreichte zu beleuchten und den Fokus für das nächste Symposium gemeinsam zu setzen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

BRENNSTOFFZELLENTECNOLOGIE

SOFC-Brennstoffzellen

Zwei tragbare Prototypen einer SOFC-Brennstoffzelle wurden von *HTceramix* in Zusammenarbeit mit dem *Institut d'énergie et de systèmes énergétiques* der *FH Yverdon* im Projekt **Development of an autonomous transportable SOFC system operating on C-based fuel** [19] gebaut und werden an diesen beiden Institutionen als Demonstratoren zum Einsatz kommen (siehe Fig. 20). Hierbei wurde ein spezielles thermisches Management realisiert, so dass das System in der erforderlichen Zeit sich aufheizt. Zudem haben die Versuche gezeigt, dass die Konvertierung von Methanol im Reformer möglich ist (siehe Fig. 20). Ebenfalls erreicht wurden die Spezifikationen für das Gewicht des Systems. Weitere, verbesserte und validierte Versionen sollen in der Folge als Demonstratoren im Nischenmarkt «Unterricht» verkauft werden.



Figur 20: Der Test des Reformerkatalysators für Methanol brachte für die Praxis brauchbare Resultate [19].

PEFC-Brennstoffzellen

Sowohl im stationären (Batterieersatz in USV-Anlagen) als auch im portablen Bereich (APU-Anhänger, luftgekühlter 1kW-Stack) sowie im Transportbereich (Boote, Spezial-Fahrzeuge) wurden die Umsetzungsaktivitäten fortgesetzt. Um die Gründe für Unzulänglichkeiten, die erst während dem Betrieb von Demonstratoren und Pilotanlagen auftauchen, zu finden sowie die Qualität der Entwicklungen zu steigern, ist ein Monitoring mit anschließender Auswertung der Betriebsdaten unerlässlich.



Figur 21: Übersicht über die Einbaupositionen des Staps im BZ-Fahrzeug SAM [20].

Der 6 kW Brennstoffzellenstapel für den LEV-SAM verzeichnete innerhalb von 2 Jahren einen erheblichen Leistungsverlust. Von anfänglichen 6,25 kW Stapelleistung im Jahr 2004 waren nach 2 Jahren Betrieb nur noch 2,0 kW übrig geblieben (siehe Fig. 21). Interessanterweise erfolgte der Performance-Verlust schubweise, so dass die grössten Einbussen nach längeren Stillstandszeiten des Staps auftraten. Das Ziel des Projektes **Analyse der vorzeitigen Alterung des PEM-Stacks im LEV SAM** [20] der FH Biel ist die Ermittlung des Ist-Zustandes des 2004 gebauten Brennstoffzellen-Staps, sowie die Beurteilung des Performanceverlustes und die Diskussion von Verbesserungsvorschlägen zur Reaktivierung des Staps.

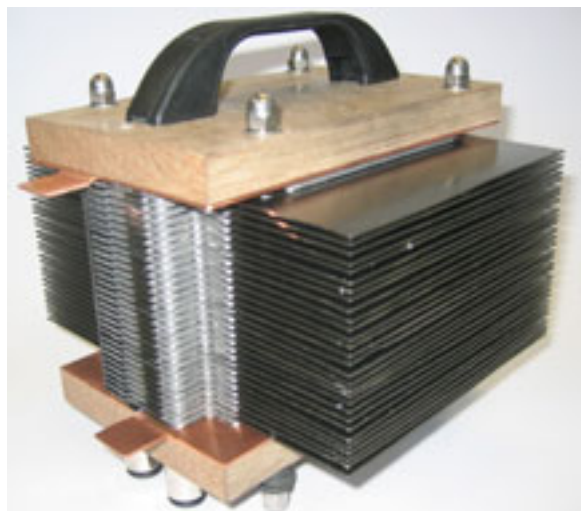
Erste Untersuchungen am Stapel ergaben, dass die Performance-Verluste aufgrund von Verschmutzungen auftraten, die durch eine ungenügend gute Dichtung zwischen dem Kühlwasser und der Zellen hervorgerufen wurden. Die Vertiefungstaschen in den Graphitflussfeldplatten, in welchen die Elektroden der Membran-Elektroden-Einheiten liegen, sind zu wenig tief. Hierdurch kann die flexible Dichtung nicht optimal dichten, da sie nicht genügend stark zusammengepresst wird. Dies führt einerseits dazu, dass Kühlwasser in die Gaszellen der Brennstoffzellen gelangen kann. Die Undichtheit der flexiblen Graphitschicht führte zu einem weiteren Problem. Wenn der Brennstoffzellenstapel längere Zeit ungenutzt herumsteht, kann er austrocknen. Je schneller er austrocknen kann, um so eher werden die Membranen durch Schrumpfen beschädigt. Da die Membran aber

durch die Flussfeldstruktur eingeklemmt ist kann sie sich nicht frei bewegen und so spannt sich die Membran, bis sie überdehnt wird und kleinste Risse oder Mikrolöcher entstehen können. Als Folge verliert die Zelle deutlich an Leerlaufpotential und benötigt eine höhere Gasstöchiometrie. Nach der Inbetriebnahme neuer Stapel muss daher darauf geachtet werden, dass der Stapel regelmässig in Betrieb genommen wird, so dass er allzeit genügend feucht bleibt. Idealerweise sollte der Stapel jede Woche eine Stunde in Betrieb genommen werden.

Neuere Entwicklungen in der Reformattechnik zeigen, dass auch PEFC kleinerer Leistung mit reformierten Gasen betrieben werden können. Da die Zusammensetzung des Anodengases dabei recht unterschiedlich sein kann, müssen die Stacks mit flexiblen Gasgemischen getestet werden können. Im neu gestarteten Projekt **Erweiterung des BFH Testlabors für PEM-Brennstoffzellen** [21] wird eine Anlage zur Beimischung von CO und N₂ zum Wasserstoff, der Aufbau eines Teststandes für PEFC-Stacks im kleinen Leistungsbereich sowie eine Testanlage für Einzelzellen aufgebaut. U.a. ist auch im Hinblick auf eine Weiterentwicklung des *IPHoS*-Stacks eine Erweiterung des bestehenden Teststandes unumgänglich.

Mit dem Ziel, aus einem früheren Forschungsobjekt (ein 500 W Stapel mit 32 Zellen) ein kommerzielles Produkt zu entwickeln, wird an der FH Biel in Zusammenarbeit mit der Firma *CEKA Elektrowerkzeuge* aus Wattwil in Rahmen des BFE/KTI-Projekts **IPHoS, luftgekühlten PEM-Brennstoffzellenstapel** [22] ein PEFC-Stapel für die industrielle Anwendung entwickelt (siehe Fig. 22). Als Konstruktionsmaterialien für die Bipolarplatte werden bewährte flexible Graphitfolien eingesetzt, deren Vorteil in einer einfachen Verarbeitung liegen und dadurch sehr schnell und verhältnismässig kostengünstig hergestellt werden können. Im Berichtsjahr wurden mehrere Stackgenerationen aufgebaut in welchen u.a. die Ergebnisse der thermischen Simulationen und die Patentsituation berücksichtigt werden konnten. Dabei konnte die Leistungsfähigkeit des Stacks erhöht werden, die Anforderungen an die Peripherie verringert und der Zellaufbau erheblich vereinfacht werden. Die Eignung des Stapels für Anwendungen mit Reformatgas wurde auf Wunsch eines Systemintegrators in das Projekt aufgenommen. Die Untersuchung zur Tiefstartfähigkeit wurde zurückgestellt. Zudem konnte an der FH Biel ein weiterer Demonstrator für den *IPHoS*-Stack in Form einer tragbaren Stromversorgung gebaut und getestet werden.

Im Projekt **PacBoat: Possibilités et limitations des piles à combustibles dans la navigation** [23] werden an der FH in Yverdon die Möglichkeiten und Grenzen brennstoffzellenbetriebener



Figur 22: Der in Zusammenarbeit FH Biel und CeKa AG im KTI Projekt *IPHoS* entwickelt, luftgekühlte PEFC-Stapel [22].



Figur 23: *PacBoat*: eine 300W PEFC Brennstoffzelle dient als Powersupply für den elektrischen Antrieb eines Fischerbootes Jonson - MinneKota [24].

Boote für Seen und Kanäle ausgelotet. Verglichen wurden dabei die Eigenschaften der bisher am Institut gebauten brennstoffzellenbetriebenen Boote mit solchen mit reinem Batteriebetrieb. Eingeflossen sind auch die Resultate des Projektes **PacBoat Integration d'une pile à combustible 300W pour la motorisation électrique de petites embarcations** [24], einem Batterie/Brennstoffzelle betriebenen Fischerboot (siehe Fig. 23). Die Brennstoffzelle (300W) wurde von *Horizon Fuel Cell Technology* (Singapore), das Antriebssystem (1500W) von *Jonsohn Outdoors* (USA) inklusive technischer Beratung geliefert. Die Analyse aller Betriebsdaten zeigte klar, dass die Grenzen durch die Speicherkapazitäten von Wasserstoff auf dem Boot gesetzt sind. Anlässlich der in Yverdon organisierten *Journée ER06 (énergies renouvelables dans les domaines du bâtiment et de la mobilité)*



Figur 24: Aussen Ansicht der USV-Anlage für Mobilfunkantennen mit Luftkühler und H_2 -Druckflaschen direkt neben der Antenne [26].



Figur 25: Tisch-Demonstratormodell zur photoelektrolytischen Wasserspaltung mittels Sonnenlicht (WO_3 -Photoanode mit Pt-Kathode und Spannungserhöhung durch Si-Photovoltaikzelle – im Quarzglasbehälter mit $1M H_2SO_4$ als Elektrolyt) [27].

[25] wurde die Öffentlichkeit über die neuesten Resultate der Brennstoffzellen-Boote informiert.

An der FH Luzern wurde im Projekt **USV für GSM-Basisstationen mit BZ(PEM Fuel Cell Back-Up System)** [26] ein Anlage-Prototyp zur Unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) mit Brennstoffzellen anstelle von Bleibatterien konzipiert und erfolgreich in Betrieb gesetzt. Das verzögerte Anfahrverhalten der Brennstoffzelle wird durch Superkapazitäten überbrückt. Die erste Projektphase umfasste Planung, Systemzusammenbau und Labortests. In der zweiten Projektphase wurde das Brennstoffzellen-System an eine reale Telekommunikations-Basisstation (Antenne) angeschlossen und im Feldtest für den Zeitraum eines Jahres erprobt (siehe Fig. 24). Der Feldtest umfasste monatliche Stromausfall-Simulationen bei einer realen Verbraucherlast von ca. 3.3 kW sowie Tests mit externer Last bis 8.5 kW zur Aufnahme der Kennlinie. Wasserstoff wird über zwei 50 Liter Druckgasflaschen zur Verfügung gestellt, die bei Antennenlast einen autonomen Betrieb der Anlage bis zu 6 h gewährleisten. Die Ergebnisse der insgesamt 138 Stromausfall-Simulationen mit einer Gesamtlauzeit der Brennstoffzelle von 39 h waren sehr zufrieden stellend. Auch bei einem unwetterbedingten, realen Stromausfall hat die Anlage für eine knappe Stunden den Strom problemlos überbrückt. Das Projekt findet in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern **APC Indus-**

trial Systems, als Hersteller und Marktleader im Bereich von USV-Anlagen und **Swisscom Mobile AG**, als Anwender von USV-Anlagen im Telekommunikationsbereich statt. Um Erfahrungen im Langzeitverhalten der Brennstoffzelle zu sammeln, wird der Feldtest für zwei weitere Jahre fortgesetzt.

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Das Projekt **Demonstrator-Zelle für photoelektrolytische Wasserspaltung** [27] bezweckt in einer ersten Phase die photoelektrochemische (PEC) Wasserspaltung anhand eines einfachen Tischmodells praktisch zu bestätigen und später die rechtliche Situation des in der Schweiz erfundenen und patentierten PEC Tandem-Zellenkonzepts zu analysieren. Für das Kleinst-Tischmodell wurde eine an der Universität Genf hergestellte nanokristalline Wolframtrioxid (WO_3) Photoanode für die Sauerstoffproduktion gewählt, während davon getrennt die Wasserstoffproduktion an einer an der Universität Bern vorbereiteten Platin-kathode erfolgte. Da die WO_3 -Photoanode nur im UV- sowie im Blaulichtspektrum absorbiert, sorgt bei diesem PEC-Demonstrator eine Photovoltaikzelle für die Absorption des restlichen Solarlichtspektrums und damit für die zur Wasserspaltung nötige Spannungserhöhung (siehe Fig. 25). Die an der FH Rapperswil aufgebaute PEC-Demonstrator-Tandemzelle eignet sich als einfaches und anschauliches Tischmodell im Freien.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Das Jahr 2006 war ein Jahr des Auf- und Umbruchs. Abgesehen davon, dass die **Programmleitung in neue Hände** gegeben wurde, was zu einer mehrmonatigen Einarbeitungszeit mit Besuchstour

führte, ist neu auch die Wasserstoffforschung ins Programm integriert worden. Die neue Programm- und Bereichsleitung verfügt über komplementäre Kompetenzen und einen sehr guten **Teamgeist**,

welche auch kontroverse jedoch konstruktive Diskussionen und Bewertungen der Vorhaben sowie Ziele bewirkt.

Im **SOFC-Bereich** ist es ein grosser Glücksfall, dass das Know-how von *Sulzer Hexis* in der *Hexis AG* wieder neu aufblühen und die vielversprechende **Forschungs-Kooperation SOF-CH** mit *HTceramix SA* und den in diesem Bereich führenden Schweizer Forschungsinstitutionen gegründet werden konnte. Die gute Ziel-Absprache und das fokussierte Vorgehen führte zu einer sehr positiven Wahrnehmung der SOFC-Gemeinschaft, so dass auch andere Förderorganisationen wie das *CCEM*, die *KTI* und vor allem der *swisseclectric research*, das Förderprogramm der Organisation der Schweizer Stromverbundunternehmen, die Bündelung des Schweizer SOFC Know-hows estimiert.

Im **PEFC-Bereich** sind die zielbewusste Weiterführung der Aktivitäten bei *Ceka AG* in verschiedenen Projekten sowie das erneute Hinzukommen von *MesDea SA* auf dem Schweizerischen Forschungs-Parkett besonders erwähnenswert. Dies bedeutet eine Erweiterung der künftigen Brennstoffzellen-Marktabdeckung. Ziel ist es im nächsten Jahr die unterstützen Forschungsaktivitäten mit dem PSI, den Universitäten und Fachhochschulen zum Nutzen beider Industriepartner über eine **fokussierte Roadmap** optimal zu koordinieren und den Aufbau von Nischenmarktanwendungen zu unterstützen. Die verstärkte Nutzung von Synergien ist beim weiterhin reduzierten Energieforschungsbudget des BFE eine wichtige Massnahme.

Im **Wasserstoffbereich** war es im Berichtsjahr – abgesehen von der Verlagerung der Aktivitäten

der Uni Fribourg zur EMPA – verhältnismässig ruhig. Im Jahr 2007 sind aber aufgrund der **an-stehenden Pensionierungen**, vorab von Prof. Calzaferri Uni Bern und Prof. Augustynski Uni Genf grössere Verlagerungen der Photoelektrolyse-Aktivitäten zu erwarten. Ziel wird es sein die **Forschungsschwerpunkte** sowie die **Schweizer Kompetenzen** kritisch zu bewerten und entsprechend international optimal positionierte Gruppen oder Kooperationseinheiten zu initiieren.

Ziel des Programms insgesamt ist es die bestehenden **Kompetenzen, Kooperation und industrielle Basis zu bündeln** und im Rahmen der Möglichkeiten auszubauen. Neben Stabilität in der Grundlagenforschung soll unter anderem auch durch längerfristige Doktorarbeiten ein entsprechender Beitrag für die Konstanz in der Ausbildung erreicht werden. Immer wichtiger ist ferner die Unterstützung zur Vernetzung der Akteure mit dem Ausland und mit anverwandten Bereichen wie beispielsweise Verkehr, elektrische Systeme und Gebäude. Speziell auch im P&D Bereich gehören das Anregen und Ermöglichen von **nationalen Verbundprojekten** sowie von **EU-Projekten** zu den wichtigsten Schnittstellenfunktion des BFE (Stichworte: Wissens- und Technologie-Transfer, Anschubfinanzierung). Hierzu soll auch das internationale Engagement zumindest bei der IEA und der HFP (Mirror-Group) der EU weitergeführt werden. Nach der Ausarbeitung und Finalisierung des Konzeptes 2008-2011, steht dann bis Ende 2007 die **Formulierung des Vierjahres-Detailkonzeptes** unter Berücksichtigung der nationalen (Industrie-)Bedürfnisse und der internationalen Vorgaben aus. Ebenfalls vorgesehen ist im Herbst 07 (KW 48) eine Neuauflage eines **nationalen HFC-Programm-Impulstages**.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 vorhanden

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

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

BRENNSTOFFZELLENTECNOLOGIE

- [1] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix, Yverdon: *Advanced Test Set-up for long-Term Testing of Anode supported SOFC* (JB).
- [2] S. Duval, P. Holtappels (peter.holtappels@empa.ch), Empa, Dübendorf: *Intermediate Temperature Fuel Cells based on Ceramic Proton Conducting Electrolytes*, (SB)
- [3] A. Bieberle et. al. (anja.bieberle@mat.ethz.ch), ETH Zürich: *A Mikro-solid Oxide Fuel Cell System for Battery replacement* (Zusammenfassung, Überblick)
- [4] Michael Stutz (michael.stutz@lnt.iet.mavt.ethz.ch), Nico Hotz (nico.hotz@lnt.iet.mavt.ethz.ch), Nicole Bieri (nicole.bieri@lnt.iet.mavt.ethz.ch), Dimos Poulikakos (dimos.poulikakos@sl.ethz.ch), ETH Zürich: *Micro-Solid Oxide Fuel Cell on the Chip* (SB).
- [5] Josef Sfeir (josef.sfeir@hexis.com) Hexis AG, Winterthur: *Enhancing the lifetime of SOFC stacks for combined heat and power applications* (JB)
- [6] F. Büchi, M. Roos, (felix.buechi@psi.ch), PSI, Villigen, (markus.roos@zhwin.ch) ZHW, CCP, Winterthur: *Numerische Modellierung von PEFC, Weiterentwicklung und erste Validierung des 2D+1 Modellansatzes*, www.ccp.zhwin.ch/seses/docu.php (SB).

- [7] G. Scherer et al. (guenther.scherer@psi.ch), PSI, Villigen: **Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H₂ oder Methanol als Brennstoff**, (SB).
- [8] G. Scherer et al. (guenther.scherer@psi.ch), PSI, Villigen: **Protonenleitende Polymere Membranen für Brennstoff- und Elektrozellen**, (JB).
- [9] A. Rainer et al.: **Influence of the Morphology on the Platinum Electrode Surface Activity**, J. Power Sources, **156**, 28-32, 2006.
- [10] D. Thiele, A. Züttel, (andreas.zuetzel@bluewin.ch), EMPA, Dübendorf: **New Highly Active Oxygen Reduction Electrode for PEM Fuel Cells and Zn/Air Battery Application (NORA)**, (JB).
- [11] G. Schuler, (gabriel.schuler@psi.ch), PSI, Villigen: **Lokale Gasphasenanalyse an PE-Brennstoffzellen** (JB).

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

- [12] J. Augustynski (jan.Augustynski@chiam.unige.ch), Université de Genève: **Photolyse de l'eau et production d'hydrogène au moyen de l'énergie solaire** (JB)
- [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** (JB).
- [14] W. Hyk, J. Augustynski, Université de Genève: **Under the Conditions of Mixed Diffusional and Migrational Mass Transport**, J. Electrochem. Soc., **153**, A2326 (2006) also selected for Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology, Nov. 13, 2006.
- [15] Egbert Figgemeier, (Edwin.Constable@unibas.ch, egbert.figgemeier@unibas.ch), Universität Basel: **Nanocrystalline Electrodes Functionalized with Light Sensitized [2Fe-2S]-Iron-Sulfur Clusters for Hydrogen Production (NEFIOS-Hydro)** (JB).
- [16] A. Currao (currao@iac.unibe.ch), Calzaferri (calzaferri@iac.unibe.ch) Universität Bern: **Photochemische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie** (JB).
- [17] A. Züttel (andreas.zuetzel@empa.ch) EMPA Dübendorf: **Wasserstoffspeicherung in Metall- und komplexen Hydriden** (JB).
- [18] K. Yvon (Klaus.yvon@cryst.unige.ch), Université de Genève: **New metal hydrides for hydrogen storage in fuel cell systems** (JB).

Liste der P+D-Projekte

BRENNSTOFFZELLENTHEOLOGIE

- [19] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix, Yverdon: **Development of an autonomous transportable SOFC system operating on C-based fuel** (SB).
- [20] M. Höckel, (hkm1@bfh.ch), Hochschule für Technik und Informatik, Biel: **Analyse der vorzeitigen Alterung des PEM-Stacks im LEV SAM** (SB).
- [21] M. Höckel, (hkm1@bfh.ch), Hochschule für Technik und Informatik, Biel: **Erweiterung des BFH Testlabors für PEM-Brennstoffzellen** (JB).
- [22] M. Höckel, (hkm1@bfh.ch), Hochschule für Technik und Informatik, Biel: **IPHoS, luftgekühlten PEM-Brennstoffzellenstapel** (JB).
- [23] J.F. Affolter, (jean-francois.affolter@heig-vd.ch), HES-SO / HEIG-VD, <http://energies-renouvelables.hes-so.ch/> Yverdon: **PacBoat: Possibilités et limitations des piles à combustibles dans la navigation** (JB).
- [24] J.F. Affolter, (jean-francois.affolter@heig-vd.ch), HES-SO / HEIG-VD, Yverdon : **PacBoat Integration d'une pile a combustible 300W pour la motorisation électrique de petites embarcations** (SB)
- [25] Affolter JF (jean-francois.affolter@heig-vd.ch), Carpita M, Gaille F, Schintke S, HEIG-VD, Yverdon : **Possibilités et limites des piles à combustible dans la navigation, article, recueil des conférences**, ER06, 4 octobre 2006.
- [26] U. Trachte (utrachte@hta.fhz.ch), HTA Luzern: **USV für GSM-Basisstationen mit BZ(PEM Fuel Cell Back-Up System**, (SB)

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

- [27] A. Luzzi (Andreas.Luzzi@solarenergy.ch), SPF Rapperswil: **Demonstrator-Zelle für photoelektrolytische Wasserspaltung**, (JB)

Referenzen

- [28] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENN Basel: **Erfahrungsbericht über 5 Jahre Betrieb der Brennstoffzelle vom Typ ONSI in Birsfelden**, (SB)
- [29] **Hydrogen Report Switzerland**, Download: www.hydropole.ch
- [30] 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)
- [31] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENN Basel: **Market Outlook for stationary Fuel Cells**, (JB).
- [32] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Yverdon: **Participation of Switzerland in IEA Implementing Agreement, Annex XVIII (SOFC)**, (JB).

- [33] BFE-Webseite zum Download Liste der Projekte 2004/2004, Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011, www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/index.html?lang=de&dossier_id=00798
- [34] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Yverdon: CD-ROM Helsinki Meeting vom 30.06.2006
- [35] **Internetseite der EU-Technologieplattform Wasserstoff und Brennstoffzellen:** www.hfpeurope.org (login auf Anfrage an Andreas.Gut@bfe.admin.ch)
- [36] McEvoy/Thampi (Augustin.McEvoy@epfl.ch), LPI, **Summary of fuel-cell related activities** (interner Bericht)
- [37] McEvoy/Thampi (Augustin.McEvoy@epfl.ch), LPI, **Proceedings Sommerschool Lemnos**, Sept. 2006
- [38] **1st Fuel Cell Research Symposium** 18. März 04, ETH Zürich www.nonmet.mat.ethz.ch/news_events/conference/Fuel_Cell_Research_Symposium_040318
- [39] **2nd Fuel Cell Research Symposium Modelling and Experimental Validation**, DLR Stuttgart, 3.-4. März, 2005, www.fuel-cell-mv2.dlr.de
- [40] **3rd Fuel Cell Research Symposium on Modelling and Experimental Validation**, 16.-17. März 06, Empa Dübendorf, www.empa.ch/plugin/template/empa/1032/*/--/l=1
- [41] **4th Fuel Cell Research Symposium on Modelling and Experimental Validation**, 6.-7. März 07, FZ-Jülich <http://www.fz-juelich.de/iwv/iwv3/modelling>
- [42] **5th Fuel Cell Research Symposium on Modelling and Experimental Validation**, 11.-12. März 08, ZHW Winterthur www.ccp.zhw.ch

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM VERFAHRENSTECHNISCHE PROZESSE VTP

Martin Stettler

martin.stettler@bfe.admin.ch



Energieintensive Papierproduktion

Dank der Analyse sämtlicher Papierfertigungsprozesse und deren Energieversorgung mit der Pinch-Methode sowie einer anschliessenden Prozessintegration kann ein Papierhersteller seinen Gasverbrauch um 24% reduzieren. Die dazu nötigen Investitionen lassen sich in 1,8 Jahren amortisieren (*Quelle: Ziegler Papier AG / Helbling*).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Fakten: Mit einem jährlichen Ausstoss von 6.8 Mio. Tonnen CO₂ ist der Industriesektor mit 77'000 Betrieben der zweitgrösste Emittent von Kohlendioxid. Der Sektor Dienstleistungen mit rund 240'000 Unternehmen ist für einen Ausstoss von ca. 5.2 Mio. Tonnen CO₂ verantwortlich. Grösster Emittent bleibt der Sektor Haushalte mit einem jährlichen Ausstoss von rund 12.3 Mio. Tonnen CO₂. Am gesamtschweizerischen Endenergieverbrauch hat der Industriesektor einen Anteil von 20% und ist drittgrösster Verbraucher hinter den Sektoren Verkehr und Haushalte.

Das CO₂-Gesetz zeigt Wirkung - bis heute sind rund 1700 energieintensive Unternehmen unter dem Dach der Energie-Agentur der Wirtschaft in Zielvereinbarungen eingebunden. Das sind 3,7 Mio. Tonnen CO₂ oder 35% des gesamten CO₂-Ausstosses der Wirtschaft. Diese Unternehmen verpflichten sich, bis 2010 die Energieeffizienz um 10% zu steigern und ihren absoluten CO₂-Ausstoss um 7% (Wachstum berücksichtigt) gegenüber 1990 zu senken. Die effektive Reduktionsleistung liegt wesentlich höher, wird aber durch das Wirtschaftswachstum teilweise kompensiert. In Zukunft müssen CO₂-Reduktionsmassnahmen vermehrt im Bereich der industriellen Prozesse und Verfahrenstechnik gesucht werden, denn etwa 90% der Endenergie wird in der Industrie für Produktionsprozesse eingesetzt. Bei industriellen und verfahrenstechnischen Prozessen kann von einem Energiesparpotenzial zwischen 20% und 50% ausgegangen werden.

Ausrichtung: Das Forschungsprogramm VTP richtet sich insbesondere auf die Unternehmen der Energie-Agentur der Wirtschaft, da diese in der Regel das nötige Engagement für gemeinsame Forschungsprojekte mitbringen. Das Programm unterstützt die Erarbeitung von Methoden, Werkzeugen und Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz, Senkung der CO₂-Emissionen und Integration von erneuerbaren Energien. Es unterstützt auch die Nutzbarmachung von heute noch ungenutzter Abwärme. Nebst allen Anstrengungen zur Senkung des CO₂-Ausstosses (thermische

Prozesse) wird vermehrt der Fokus auch auf Effizienzverbesserungen im Strombereich (Antriebe, mechanische Prozesse, elektrothermische Verfahren) gerichtet, denn der Stromverbrauch des Industriesektors ist beinahe gleich hoch wie der Verbrauch an Erdgas und Heizöl. Im Industriesektor ist eine Verlagerung weg von fossilen Energieträgern zu Elektrizität zu beobachten.

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: Im Berichtsjahr konnten zu allen Programmschwerpunkten neue Projekte gestartet werden. Die Bekanntmachung des Programms in der Industrie wurde fortgesetzt. Eine erste Plattformveranstaltungen «*Innovationsförderung Industrielle Prozesse*» wurde anfangs April in Olten mit 60 Teilnehmern durchgeführt. Ziel der Veranstaltung war es, Input zu den aktuellen Energieforschungsbedürfnissen der Prozessindustrie zu erhalten. Auf besonderes Interesse stiessen die Workshops «*Energetische Prozessintegration*» und «*Nutzwärme statt Abwärme*». Die Ergebnisse wurden in einer BFE-Projektausschreibung umgesetzt. Anfang November wurde das Programm VTP anlässlich der *Konferenz des EnergieSchweiz Marktbereichs Industrie & Dienstleistungen* vorgestellt. Mitte November konnten an der *EnAW-Fachtagung 2006* mit 300 Unternehmensvertretern die Programmschwerpunkte und Möglichkeiten vorgestellt werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

I. PROZESSOPTIMIERUNG UND -INTEGRATION

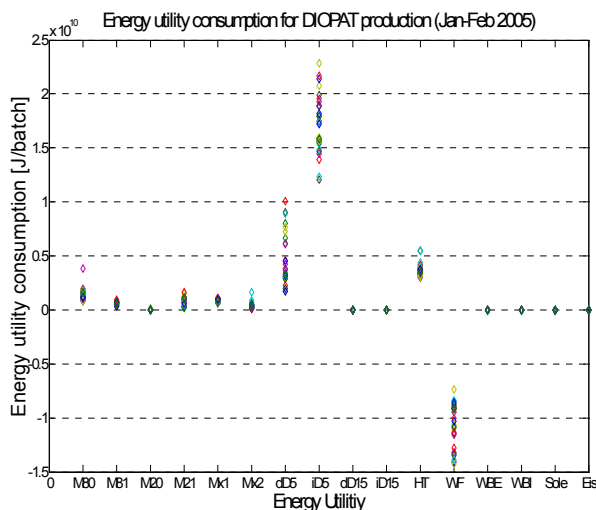
Das 2004 gestartete Projekt *Modeling and Optimization of Energy Consumption in Multipurpose Batch Plants* [1] hat zum Ziel, mit geeigneten Modellen (Top-down und Bottom-up) ein verlässliches Vorhersage- und Optimierungsinstrument für den Energiebedarf chemischer Mehrprodukte-Batchbetriebe zu entwickeln. Dabei soll der produktespezifische Energiebedarf (Elektrizität, thermische Energie) aufgrund der jeweiligen

Prozessdaten (Betriebsvorschrift) prognostiziert werden, damit Herstellprozesse energetisch optimiert werden können.

Im Berichtsjahr konnte die kritische Phase der Modellentwicklung und des Datenhandlings erfolgreich abgeschlossen werden. Hingegen musste das Top down Modell fallen gelassen werden, da dieses bei Mehrprodukte-Batchbetriebe zu keinen verlässlichen Ergebnissen führte.

Ein robustes Modell im Bottom-up Ansatz und auch eine genügend leistungsfähige Simulations-Software (Basis Matlab®) stehen jetzt zur Verfügung. Damit kann die sehr grosse Prozessdatenmenge automatisch und in vernünftiger Zeit und mit einem Minimum an Aufwand verarbeitet werden. Dieses Modell zur Bestimmung des Energieverbrauchs wurde während zwei Monaten im Pilotbetrieb erprobt. Bis zu 9 verschiedene Produkte (30 Batches) wurden in dieser Periode hergestellt. Mit dem Modell konnten die grössten Energieverbraucher identifiziert und der Energiebedarf jedes Prozessschrittes genau untersucht werden. Die Versuchsergebnisse zeigen eine recht grosse Varianz (Figur 1) zwischen den einzelnen Batches. Die Analyse der Prozessbedingungen kann Schlüssel sein, die Prozesse anderer Produkte entsprechend zu optimieren.

Weitere Erkenntnisse brachten die Messungen und die Modellierung des Dampfverbrauchs von 18 im Volumen (10-40 m³) stark unterschiedlichen Reaktoren. Es zeigte sich, dass die relativen Energieverluste bei grossen Reaktoren erheblich kleiner sind als bei kleinen. Auf Grund dieser positiven Resultate wird nun in der letzten Projektphase ein Produkt ausgewählt und anhand der entwickelten Methode beispielhaft analysiert und der Herstellungsprozess entsprechend optimiert. Die in diesem Projekt entwickelte Methodik und Software-Tools können später für weitere Chemie- Batchbetriebe mit gleichem Prozessdaten-Management verwendet werden.

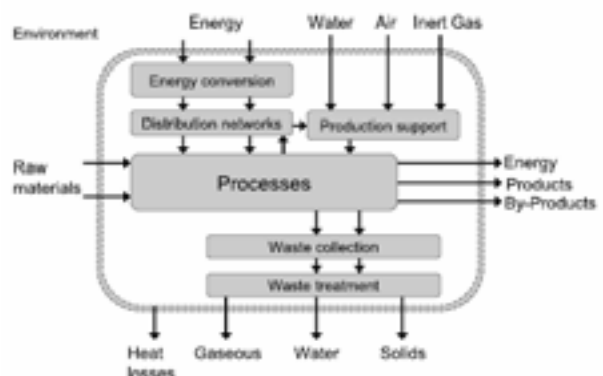


Figur 1: Variabler Energieverbrauch verschiedener Batches.

Das Forschungsprojekt **Efficient Energy Conversion in the Pulp and Paper Industry, EECPI** [2] fügt sich mit einer Fallstudie in das internationale Projekt **Novel Technologies für Energy Efficiency and Eco-Industrial Clusters in the pulp and Paper Industry, E³PAP** ein. Am Beispiel von Borregard 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 2) die horizontalen Ströme zu maximieren und die vertikalen Ströme möglichst zu minimieren.

Im Berichtsjahr wurden die Prozessanforderungen (thermische Energie und Strom) aller wichtigen Prozessanlagen aufgenommen. Mit dem so genannten «*dual representation Approach*» (erweiterte *Pinch*-Methode) wurden die Prozessanlagen jeweils nach den Prozessanforderungen aber auch nach der verwendeten Wärmeübertragungstechnologie (z.B. Heisslufttrockner) analysiert. Damit können die Exergie-Verluste der verwendeten Technologie bestimmt und anderen Prozesskonzepten gegenüber gestellt werden. In der letzten Phase des Projekts werden konkrete Verbesserungsmassnahmen auf Ebene Prozesse, Wärmeübertragungstechnologie und Energieversorgung abgeleitet werden.

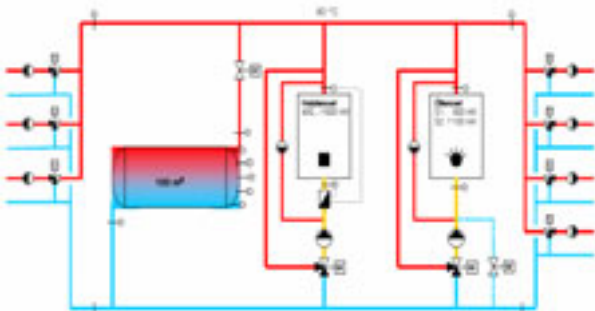


Figur 2: System der Prozessanalyse.

Das Projekt **HORTISOL – Energetische Prozessintegration in Gewächshauskulturen** [3] wurde im Frühling 06 abgeschlossen. Entwickelt wurde eine handliche Software, mit der die wachstumsrelevanten Vorgänge (Prozesse) in einem Produktionsgewächshaus simuliert werden können. Auf Basis der photosynthetisch aktiven Strahlung, dem CO₂-Gehalt der Innenluft und der Temperatur können mit der Software **HORTISOL** entsprechende Klimastrategien abgeleitet werden, die letztlich zu optimierten Jahreskosten (Investitions-, Energie- und Betriebskosten), höherem Gewinn durch einen früheren Ertrag und hoher Produktivität führen. Das von der Fachhochschule Wallis (HEVs) entwickelte Simulationstool wurde an der ÖGA 2006 dem Fachpublikum vorgestellt.

Neu konnte ein Projekt **Prozessoptimierung bei der Wärmeerzeugung mit Holz in Gewächshäusern** [4] unterstützt werden. Gewächshäuser

werden in der Schweiz (wie auch im auf Gewächshauskulturen spezialisierten Holland) in der Regel mit Öl-, Erdgas- oder Propangas beheizt. Es gibt nur wenig Erfahrung im Bereich effizientes Beheizen von Gewächshäusern mit Biomasseheizung. Die Wärmeanforderungen von Gewächshäusern sind abhängig von der oft schnell wechselnden Witterung sowie der Bauart der Gewächshaushülle. Das führt zu neuen Anforderungen für eine Holzheizung. Seit Anfang 2006 erzeugt ein Holzkessel mit 1,6 Megawatt Heizleistung und einem 100 Kubikmeter grossen Energiespeicher die benötigte Wärme für die Gewächshäuser (Figur 3). Eine neue «intelligente» übergeordnete Steuerung (Klimacomputer) ist zusammen mit dem grossen Speicher die Grundlage für den bisher sehr zufrieden stellenden Betrieb der Anlage. Die übergeordnete Steuerung berechnet aus den Betriebsdaten der letzten 24 Stunden und der Wetterprognose der nächsten 24 Stunden die notwendige Heizleistung und passt das Wärmeangebot dauernd den aktuellen Wetterbedingungen an. Sie sorgt damit für eine hohe Anlageneffizienz und für minimale Energieverluste. Dank der ausgeklügelten Steuerung und des grossen Speichers war bisher der Einsatz des bestehenden Ölkessels zur Spitzenabdeckung nicht erforderlich. Mit diesem Forschungsprojekt konnte erstmals die Auslegung und Einbindung einer innovativen Biomassefeuerung sowie Programmierung des Klimacomputers in Gewächshäusern grundlegend untersucht werden. Die Erkenntnisse kommen in erster Linie den drei Gewächshauszielvereinbarungsgruppen der *Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW)*, aber auch weiteren in der Schweiz ansässigen Gewächshausproduzenten, zugute.

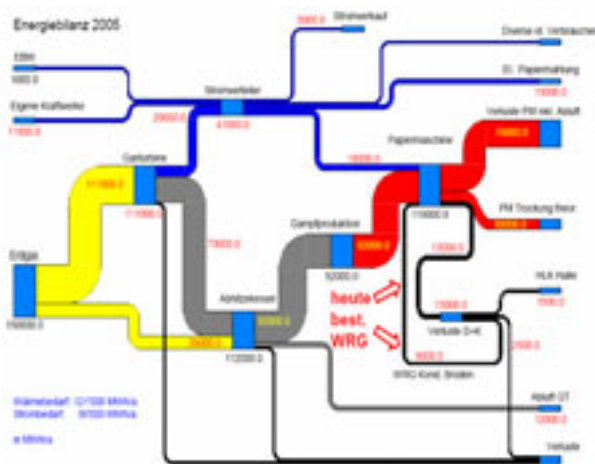


Figur 3: Wärmeerzeugung mit Holz-, Ölkessel und Speicher, En-control GmbH.

Mit dem Projekt **Gesamtenergiestudie mit der Pinch-Methode - Energie- und Produktionskostensenkung** [5] wird beispielhaft das Vorgehen einer Prozessanalyse und -integration anhand einer Papierfabrik gezeigt. Im Jahr 1995 wurde bei diesem Papierhersteller bereits eine Energiestudie durchgeführt. In der Zwischenzeit hat sich die Produktion jedoch um 50 % auf deutlich über 60'000 t/a Papier erhöht. Entsprechend stiegen der Gesamtstromverbrauch im Jahr 2005

auf 36 GWh/a und der Nutzwärmeverbrauch auf 92 GWh pro Jahr. Die Energiekosten erreichten knapp 10 Mio. CHF pro Jahr (kalkulatorisch) und weisen einen bedeutenden Anteil an den Produktionskosten auf. Einsparungen wirken sich direkt auf den kosten- und CO₂-relevanten Erdgasverbrauch aus.

Die Analyse wurde systematisch mit der Pinch-Methode durchgeführt (Figur 4). Grösster Einzelverbraucher ist die Papiermaschine mit ca. 76 % des Wärme- und 50 % des Strombedarfes sowie stromseitig die Papiermahlung und -aufbereitung mit ca. 36 %. Die Gebäude haben mit ca. 2-3 % einen tiefen Verbrauchsanteil. Es konnten in 2 Varianten je zwölf Einzelmassnahmen identifiziert werden. Es sind dies u.a. eine direkte Gasturbinenabgasnutzung für die Papiermaschine, Prozessoptimierung und Wärmerückgewinnung im Papierprozess, Maschinenzuluft-Abluft-Wärmerückgewinnung, mechanische Brüdenkompression als Dampfveredelung, die Nutzung eines Druckgefälles für eine Dampfturbine und klassischen Stromsparmassnahmen. Sie ermöglichen eine Einsparung von bis 24 % an Erdgas entsprechend über 1.4 Mio. CHF/a und ca. 1 % Strom. Total müssten ca. 1.7 Mio. CHF investiert werden. Die Massnahmen haben einen gesamthaften Payback von 1.3-1.8 Jahren.

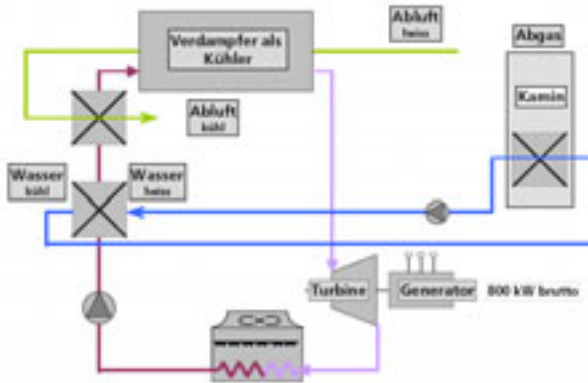


Figur 4: Energieflussdiagramm.

Das Projekt **Stromproduktion aus Abwärme** [6] soll klären, wie «heute nicht weiter nutzbare» Abwärme aus der Industrie zukünftig genutzt und in rentablen Strom umgewandelt werden kann. Damit sollte die Energieeffizienz durch Abwärmeeinnutzung gesteigert, der Netzbezug reduziert und indirekt zusätzliche CO₂-Emissionen vermieden werden.

Der ORC-Prozess für die Umwandlung von Abwärme in Strom wurde in den Grundzügen ausgelegt (Figur 5). Dazu wurden die Abwärmequellen in Form von Volumenstrom in Funktion der Zeit, Zusammensetzung und Temperatur bei zwei Firmen,

welche als Pilotunternehmen in Frage kommen, erfasst. Nach dem Bestimmen der anfallenden Abwärmemenge wurde eine Turbine ausgewählt. Mit den dadurch gegebenen Eckdaten wurde der ORC-Kreislauf definiert. Das Medium ist ein in der Luft stabiles Kältemittel; es unterliegt daher gemäss ChemRRV der Bewilligungspflicht. Auf Basis des Life Cycle Assessments, das für diese Anlage erstellt wurde, erteilte das BAFU die nötige Bewilligung. Nach Abschluss dieser Vorarbeiten und dem Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit wurde ein PC-Programm zur Berechnung und Optimierung der Prozesse entwickelt. Es wurden erste technische Ergebnisse des ORC-Prozesses berechnet. Die konstruktive Anpassung der Turbine und deren optimale Einpassung aufgrund des Jahresverlaufs der thermodynamischen Zustände ist noch ausstehend. Das ORC-Konzept soll einen elektrischen Wirkungsgrad von über 10% erreichen. Das Projekt ist zeitlich im Rückstand.



Figur 5: Schema des geplanten Prozesses zur Abwärmenutzung.

Mit der Studie **Zentrale Kälteversorgung und Aufbau der Kühlung für Konvektionshallen** [7] wurden bei einem grossen Hygiene-Papierhersteller die Einsatzmöglichkeiten einer mit Prozessabwärme betriebenen Absorptionskältemaschine (AKM, Figur 6) analysiert. Es wurde untersucht, wie weit die im ganzen Werk verteilten Kälteerzeugungen (474 kW) zentralisiert und wie zusätzlich zwei Konvektionshallen mit zu hohen Raumlufttemperaturen von 42°C gekühlt werden könnten. Der totale Kälteleistungsbedarf der wirtschaftlich vertretbaren Lösung ergab eine Auswahl von Kältegeräten mit insgesamt 320 kW Kälteleistung. Unter Einbezug der beiden Konvektionshallen liegt der Kälteleistungsbedarf bei 1490 kW. Als Abwärmequelle steht Dampf aus der Abfall- und Papier-Reststoffverbrennung (Wirbelschichtverbrennung) hochwertiger Dampf im Überschuss und zum «Nulltarif» zur Verfügung. Mit Kältegestehungskosten von 5.63 Rp./kWh ist die zentrale Kälteerzeugung mit einer AKM gegenüber einer konventionellen elektromotorisch betriebenen Kältemaschine mit 7.94 Rp./kWh

deutlich im Vorteil und es könnten so 870 MWh elektrische Antriebsenergie eingespart werden. Die dafür notwendigen Mehrinvestitionen einer AKM liessen sich in 2,5 Jahren amortisieren.



Figur 6: Absorptionskälteanlage (Quelle FH Burgdorf).

Fazit: Obwohl die an sich hochwertige Dampfenergie mit Energiepreis null eingesetzt worden ist, ist die Wirtschaftlichkeit (Anschlusslänge, Grösse) bei den kleinen Klimageräten rasch nicht mehr gegeben, da die Verteilkosten von Kälte sehr hoch sind. Energetisch sinnvoll und wirtschaftlich ist der Einsatz der Absorptionskältetechnik für zentrale grosse Kälteverbraucher; es kann wertvolle elektrische Energie eingespart werden und die dafür notwendige Mehrinvestition ist innerhalb von 2,5 Jahren amortisiert.

II. VERBESSERUNG KOMPLEXER PRODUKTIONSVERFAHREN

Im Rahmen des Projekts **Steigerung der Energieeffizienz in der Backstein-Produktion** [8] wurden drei Hauptziele verfolgt:

- Erarbeitung eines möglichst allgemeinen Konzepts für die Analyse älterer Backsteinproduktionsanlagen hinsichtlich noch nicht genutzter Einsparpotenziale;
- Untersuchung der Fragestellung, inwieweit sich durch einen Anlagenverbund im gleichen Marktgebiet ein energetischer Nutzen ergibt;
- Entwicklung eines EDV-Tools, mit dessen Hilfe die energetischen Auswirkungen von Effizienzmassnahmen vorgängig abgeschätzt werden können.

Um die Ziele erreichen zu können, war eine theoretische Auseinandersetzung mit den Prozessen erforderlich. Um die theoretischen Überlegungen absichern zu können wurde nach einem auf die Bedürfnisse der mittelständisch geprägten Schweizer Backsteinindustrie abgestimmten Messkonzepts gesucht. Beide Aufgabengebiete wurden nebst ausländischen Messspezialisten für Brennprozesse durch Studierende der HSR

Hochschule für Technik Rapperswil im Rahmen von Semesterarbeiten bearbeitet.

Der Backstein-Brennprozess ist durch instationäre Wärmeleitungsvorgänge geprägt. Deren mathematische Modellierung ist äusserst kompliziert und während des Projektes letztlich nur im Ansatz gelungen. Viel Zeit nahm die Überprüfung der physikalischen Zusammenhänge (Massen- und Energiebilanzen) mittels eines geeigneten Messkonzepts zu reproduzieren in Anspruch. Auch dabei stiess das Projektteam auf erhebliche praktische Schwierigkeiten. Die wesentliche Erkenntnis daraus ist, dass gut reproduzierbare Messungen von Gasgeschwindigkeiten, aus denen sich Energieströme errechnen lassen in der Produktionsanlage alles andere als trivial sind. Z.B. konnten die Tortemperaturen aus praktischen Gründen nur am Torrand gemessen werden (Figur 7). Die nicht ausgeglichenen Massen- und Energiebilanzen beruhen zum grössten Teil auf unkontrollierten Lufteintritten.

Insgesamt konnten die formulierten Projektziele nicht erreicht werden. Allerdings wurden wertvolle Energieoptimierungsansätze gefunden, die erhebliche Einsparpotenziale versprechen. Allfällige weitere Forschungsaktivitäten müssten einerseits von der Backsteinindustrie und vor allem von der wissenschaftlichen Seite (Prozess- und Strömungssimulation und Messtechnik) breiter abgestützt werden. Speziell müsste das heute gängige Wärmeverbundkonzept Tunnelofen – Trockner hinterfragt und untersucht werden.

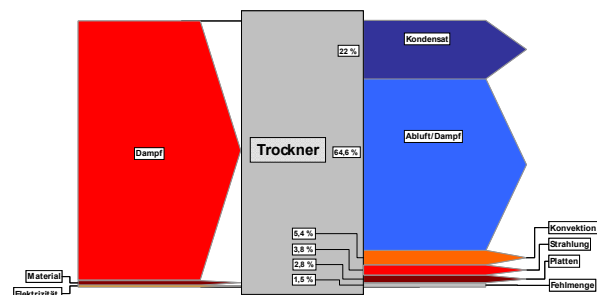
III. ENERGIEEFFIZIENTERE TROCKNUNGS- UND TRENNVERFAHREN

Ziel des Projekts **Analyse der Trockner bei Pavatex** [9] ist es, den Trocknungsprozess besser



Figur 7: Eingang zum Tunnelofen.

zu verstehen und damit dessen Energieeffizienz zu verbessern und die damit verbundenen CO₂-Emissionen zu reduzieren. Denn die Trocknung von Faserplatten braucht etwa 80 % des gesamten Wärmeverbrauchs und ist damit auch bezüglich CO₂-Ausstoss dominierend. Der eigentliche Trocknungsprozess ist heute thermodynamisch noch nicht im Detail bekannt; das führt u.a. dazu, dass die unterschiedlichen spezifischen Trocknungs- Wärmeverbräuche in den Werken Cham und Fribourg (trotz gleichen Produkts) nicht hinreichend erklärt werden können; zudem entspricht der Temperaturverlauf in Cham nicht den Vorstellungen des Betreibers. Die Messungen (Figur 8) haben gezeigt, dass die Wandwärmeverluste der Trockner insgesamt unbedeutend sind, die Abwärmeverluste in der Abluft dominierend sind und nur geringe Optimierungspotentiale bei der Regelung der Abluft bestehen.



Figur 8: Energieflüsse im Trockner.

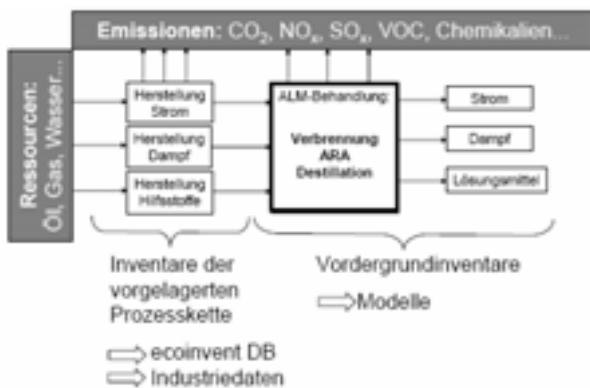
Die Trockner werden bezüglich der Abluftwerte (Luftmenge, Abluftfeuchte) nahe am Optimum gefahren. Das Rückgewinnungspotential aus der Abwärme ist sehr gross. Dem gegenüber stehen die Problempunkte «stark verschmutzte Abluft» und dadurch Wärmetauscher, die schnell in ihrer Wirkung verlieren. Weiter kann die Abluft wegen der geringen Feuchtigkeit nicht bis auf oder gar unter den Taupunkt abgekühlt werden. Dazu sind zum einen Verbraucher mit entsprechend tiefer Temperatur nötig und/oder die Abluft muss verdichtet werden, so dass der Taupunkt ansteigt und ein Teil der Kondensationswärme genutzt werden kann. Zur Nutzung des Abwärmepotentials sind zuerst Wärmetauscher zu entwickeln, die unter diesen Bedingungen befriedigende Ergebnisse liefern. Sollte der Taupunkt (permanent und deutlich) unterschritten werden können, würde sich die Situation entschärfen, da die Wärmetauscher-Oberflächen permanent nass sind und der Schmutz weniger gut haften kann resp. abgeschwemmt werden kann.

IV. NACHHALTIGER UMGANG MIT ENERGIE UND RESSOURCEN

Im Projekt **Abfall-Lösungsmittel (ALM)-Verwertung in der chemischen Industrie** [10] wurde

ein Bilanzierungs-Modell zur ökologischen Bewertung der wichtigsten ALM-Behandlungstechnologien der chemischen Industrie aufgebaut und in ein anwenderfreundliches Software-Tool umgesetzt.

Die Schweizerische chemische Industrie ist zwar bestrebt, ihre Abfall-Lösungsmittel (ALM) ökologisch nachhaltig zu behandeln, doch werden heute rund 70% der ALM zwecks Substitution fossiler Energieträger in Wärmeerzeugungsanlagen verbrannt. Die heutige Praxis des CO₂-Gesetzes akzeptiert die thermische Verwertung vorweg als sinnvolle CO₂-Reduktionsmassnahme. Einen Nachweis resp. Vergleich mit anderen Verwertungsmethoden konnte bisher nicht erbracht werden. Es fehlten verlässliche Beurteilungsmethoden, Ökoinventare und Software fehlten, welche die Umweltauswirkungen der ALM-Behandlungstechnologien (Verbrennung, Lösungsmittelregeneration mittels Destillation, Kanalisierung in Abwasserreinigungsanlagen (ARA) der wichtigsten Lösungsmittel) quantitativ erfassen können. Mit dem Tool *Ecosolvent* konnte diese Lücke geschlossen werden. Basierend auf der Methode der Ökobilanz (Figur 9) steht nun ein Verfahren zur Verfügung mit dem Umweltwirkungen quantifiziert und diese als ökologische Kriterien in die Entscheidungsfindung im ALM-Management aber auch in den behördlichen Vollzug aufgenommen werden können.



Figur 9: Bilanzierungsgrenze - Sachbilanz.

Ziel des im Sommer 2006 gestarteten Projekts **FINE-CHEM – an inventory estimation tool for fine chemicals** [11] ist es, ein Tool für die schnelle und unkomplizierte Erstellung von Inventardaten (Massen- und Energiebilanzen) der Produktion von Feinchemikalien zu entwickeln. Da die herkömmliche Methode einer Inventarisierung bei Feinchemikalien zu einem extremen Arbeitsaufwand führen würde, werden Inventarisierungen nur selten und im Rahmen von Fallstudien durchgeführt. Das angestrebte Tool soll eine 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 werden können, um eine Prozessoptimierung zu erleichtern.

Ziele für 2006 waren die Datengewinnung und Verhandlungen mit den Kooperationspartnern aus der chemischen Industrie sowie die Entwicklung eines neuen Modells, um Parameter wie kumulierten Energiebedarf (CED) oder Umweltfolgen der Produktion einer Chemikalie zu bestimmen. Das Modell basiert auf der Analyse von Strukturparametern chemischer Substanzen.

Durch die Anwendung mehrerer Regressionsmodelle (multiple, lineare Regression sowie neuronale Netze) konnten Modelle erschaffen werden, durch die der CED und andere Parameter direkt aus der Molekülstruktur einer Chemikalie und ohne Informationen über den Produktionsablauf bestimmt werden können. Aus den Ergebnissen der linearen Modelle lassen sich direkt generelle, quantitative Aussagen über die Einflüsse einzelner funktioneller Gruppen machen. Die Modelle auf der Basis neuronaler Netze zeigen sich äusserst viel versprechend und erlauben eine relativ genaue Bestimmung von Parametern wie dem CED.

Nationale / internationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr unterstützte das Programm insgesamt vier Projekte aus dem ETH-Bereich (ETHZ 3; EPFL 1). Die Fachhochschule Rapperswil (HSR) wirkte in einem Forschungsprojekt der Industrie mit. Ebenfalls konnte ein Forschungsprojekt der Fachhochschule Wallis (HEVs) unterstützt werden. 5 der unterstützten Projekte kommen aus der Privatwirtschaft.

Die öffentliche Hand ist ausser dem BFE im Energieforschungsbereich der Industriellen Prozesse praktisch nicht aktiv.

Eine internationale Zusammenarbeit findet weder mit der EU noch mit der IEA statt. Lediglich ein Forschungsprojekt der EPFL im Bereich Pulp und Paper hat eine internationale Anbindung (Kanada).

Die IEA hat sich im Sektor Industrie neu organisiert und führt neu ein einziges Implementing Agreement (IA) im Industriebereich: *Industrial Energy-related Technologies and Systems (iets)*. Das IA iets fördert folgende Themen: Prozessintegration, Treibhausgasminderung in der Papierher-

stellung, Wärmeübertragungstechnologien (Wärmetauscher) und Trenn-Technologien. Alle diese Schwerpunkte sind im Forschungsprogramm VTP ebenfalls als Schwerpunkte gesetzt und ausgeschrieben. Das BFE prüft, diesem IA beizutreten

um damit wieder an den Puls der internationalen Forschung zu gelangen. IA-Mitgliedstaaten sind z.Z. Brasilien, Kanada, Dänemark, Finnland, Mexiko, Norwegen, Portugal, Schweden und die USA.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Ausser einem Projekt (Effizienzsteigerung in der Backsteinproduktion) haben praktisch alle Projekte die gesteckten Jahresziele erreichen können. Negativpunkte sind ungeplante zeitliche Verzögerungen; typisch bei Industrieprojekten und ausgelöst durch plötzliche Änderungen der Strategie oder der Investitionsentscheide.

Neue Schwerpunkte im 2007 werden bei Vereinfachung der Prozessanalyse und –Integrationsmethode und bei der Entwicklung von verschmutzungsresistenten Wärmetauschertechnologien und nicht thermischen Trenntechnologien gesetzt.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 vorhanden (siehe www.energie-schweiz.ch Rubrik Unternehmen, Forschungsprogramm VTP)

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

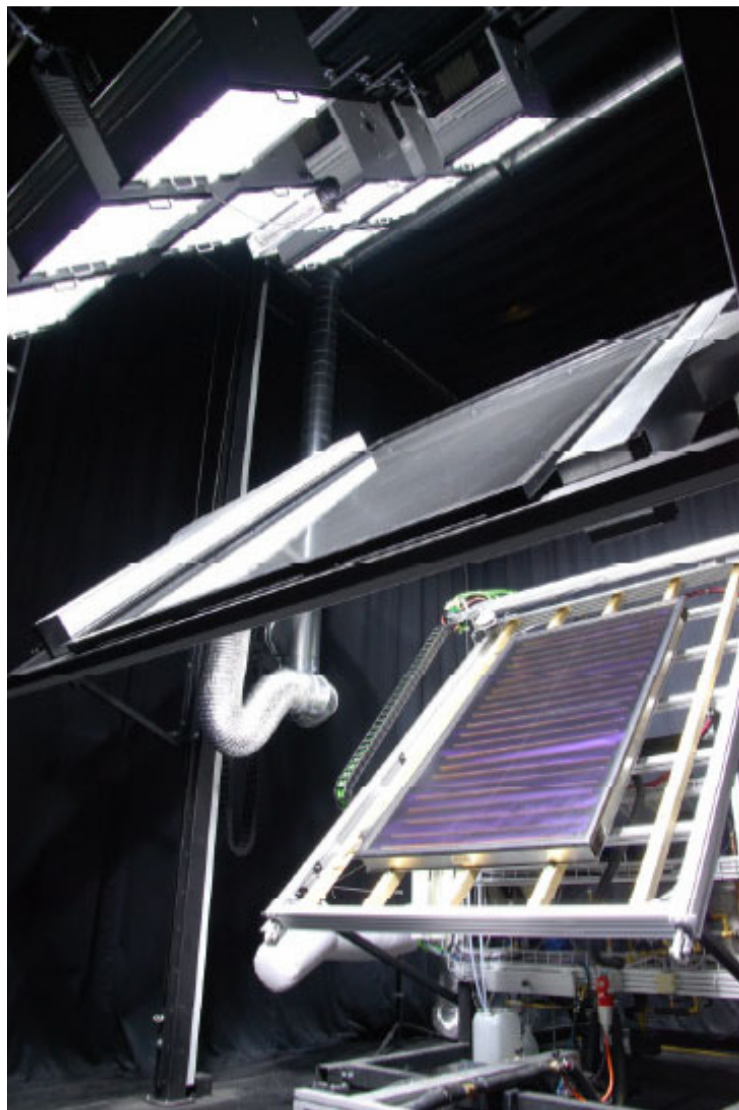
Unter den angegebenen Internet-Adressen sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

- [1] Andrej Szijarto, (andrej.szijarto@chem.ethz.ch), Institut für Chemie- und Bio-Ingenieur-Wissenschaften, Gruppe für Umwelt- und Sicherheitstechnologie, ETH Zürich: **Modeling and Optimization of Energy Consumption in Multipurpose Batch Plants**, Laufzeit 04-07 (JB).
- [2] F. Maréchal und Z. Perrin-Levasseur, (francois.marechal@epfl.ch), Laboratoire d'Energétique Industrielle, EPF Lausanne: **Efficient Energy Conversion in the Pulp and Paper Industry**, Laufzeit 05-08 (JB).
- [3] F. Bonvin, (michel.bonvin@hevs.ch) FH/HEVs Sion: **Intégration des processus énergétiques dans les cultures sous abris**, Laufzeit 05-06(JB)
- [4] D. Meier, (daniel.meier@encontrol.ch) encontrol GmbH, Niederrohrdorf: **Prozessoptimierung bei der Wärmeerzeugung mit Holz in gewächshäusern**, Laufzeit 06 (SB)
- [5] R. Morand, (raymond.morand@helbling.ch) Helbling Zürich: **Gesamtenergiestudie mit der Pinch-Methode – Energie- und Produktionskostensenkung**, Laufzeit 06(SB)
- [6] Th. Bürki, (thomas.buerki@bluewin.ch) Thomas Bürki GmbH, Benglen: **ISTromproduktion aus Abwärme**, Laufzeit 06-07 (JB)
- [7] R. Bendel, (rainer.bendel@helbling.ch) Helbling Zürich: **Studie zentrale Kälteversorgung bei Tela-Kimberly**, Laufzeit 06 (SB)
- [8] Jörg Peter Wurche, (peter.wurche@kieferpartners.ch) und Christian Gubler, Ziegelei Fisibach AG, Bauma: **Steigerung der Energieeffizienz in der Backsteinproduktion**, Laufzeit 05-06 (SB)
- [9] Th. Bürki, (thomas.buerki@bluewin.ch) Thomas Bürki GmbH, Benglen: **Prozessanalyse der Trockner in den Werken Cham und Freiburg**, Laufzeit 05-07 (JB)
- [10] Christian Capello (christian.capello@chem.ethz.ch) Institut für Chemie- und Bio-Ingenieur-Wissenschaften, Gruppe für Umwelt- und Sicherheitstechnologie, ETH Zürich: **Abfall-Lösungsmittelverwertung in der chemischen Industrie** Laufzeit 03-06 (SB)
- [11] G. Wernet (gregor.wernet@chem.ethz.ch) Institut für Chemie- und Bio-Ingenieur-Wissenschaften, Gruppe für Umwelt- und Sicherheitstechnologie, ETH Zürich: **FINE-CHEM – AN INVENTORY ESTIMATION TOOL FOR FINE CHEMICALS** Laufzeit 06-09 (JB)

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMME SOLAIRE ACTIF – CHALEUR ET STOCKAGE DE CHALEUR

Jean-Christophe Hadorn
jchadorn@baseconsultants.com



Simulateur solaire d'intérieur au SPF

Afin de pouvoir réaliser des mesures de capteurs toute l'année, le SPF a été doté d'un simulateur solaire de sa conception. Entre les lampes et le capteur, on distingue un vitrage refroidi afin de simuler au mieux la température du ciel pour tenir compte des effets radiatifs entre capteur et ciel (source : SPF).

Centres de gravité du programme et buts fixés

Le marché solaire thermique en Suisse montre des signes de développement. Il a dépassé 38'000 m² de capteurs installés en 2005 (Figure 1). Le marché domestique repart à la croissance sous l'effet des facteurs connus par ailleurs (prise de conscience, effets climatiques, volatilité du prix du pétrole à la hausse). En outre, il est à attendre un développement du solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire, et cela spécialement dans le Canton de Vaud qui, en novembre 2006, a rendu obligatoire dans les nouveaux bâtiments 30% de couverture par une source d'énergie renouvelable, en priorité solaire.

Au total, en considérant 400'000 m² de capteurs vitrés, la puissance installée est de 360 MW, et la chaleur produite est de l'ordre de 200 GWh/an, soit l'équivalent de 17'200 tep (tonnes-équivalent-pétrole).

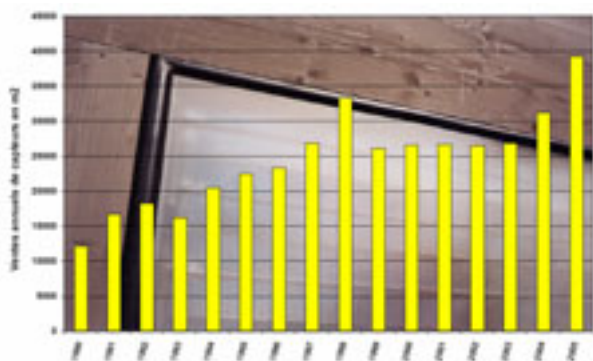


Figure 1 : vente de capteurs plans et à tubes évacués en Suisse de 1990 à 2005 (source : Swissolar).

Pour l'année 2006, nous avons orienté les travaux de R&D, dans le respect de notre programme 2004-2007, sur :

- les tests de capteurs en relation partenariale avec les industriels,
- l'installation d'un simulateur solaire intérieur au SPF,
- le stockage de chaleur dans de nouveaux matériaux ou systèmes,
- le montage d'un prototype de déphaseur thermique diffusif,
- le développement du procédé de verre solaire de couleur sur une plus grande surface,
- la livraison de *Polysun 4.0*,
- la préparation de recherche sur le froid solaire,
- les résultats de mesures du projet pilote de stockage dans le sol du bâtiment de la SUVA.

Les buts du programme restent l'augmentation de la productivité (donnée en kWh/m²) des systèmes solaires combinés, la diminution du recours à l'énergie fossile en appoint (passer la barre des 50% pour la part du solaire) et les expériences sur de nouvelles solutions pour le stockage de chaleur et de froid solaire [16].

Travaux effectués et résultats acquis pour 2006

COMPOSANTS DE LA TECHNIQUE SOLAIRE

Nous attachons la plus grande importance aux tests de qualité et de performances des composants solaires. Le SPF (*Solartechnik Prüfung Forschung*) de la HES de Rapperswil est un des meilleurs centres de tests pour les capteurs et les systèmes combinés et il reçoit un soutien important du programme. En 2006, le SPF a réalisé les travaux suivants [1, 2, 3, 4] :

Mesure des caractéristiques et test de qualité des capteurs solaires : 80 sont passés au banc d'essai du SPF. La qualité moyenne des capteurs s'est améliorée grâce au *Solar Keymark* européen. Après plusieurs années, le SPF a pu à nouveau décerner le label de qualité SPF à plusieurs capteurs. Cependant le dégazage des isolants est toujours un point critique dans beaucoup de capteurs, de plus, la ventilation est encore souvent insuffisante. Les conseils du SPF sont sur ce point de plus en plus demandés.

1. **La part de capteurs testés d'origine suisse diminue.** Les capteurs des pays de l'Est sont désormais nombreux. L'Angleterre revient avec des capteurs de nouvelle génération. L'Italie et la France ont également fait tester des nouveaux capteurs au SPF. Le fait que le *Solar Keymark* s'impose en Europe simplifie désormais la tâche de légitimité du SPF qui le délivre depuis son origine et désormais en remplacement du label SPF pour ceux qui le demandent.
2. **L'augmentation du prix du cuivre influe sur la technologie.** Des absorbeurs hybrides aluminium-cuivre sont apparus: leur durabilité est encore à démontrer. La technique du soudage au laser se répand dans l'industrie solaire. Un banc test de vieillissement accéléré a donc été monté au SPF.

3. **Les absorbeurs en aluminium se développent.** Le soudage au laser permet une production rapide sans métal d'apport. La corrosion interne reste un souci, mais les qualités d'échange peuvent être très optimisées, en ayant recours à la technologie *roll-bond*.
4. **Des éléments collecteurs de façade ont été testés.** Équipés de bardage avec capteurs acier ou en cuivre non vitrés, ils nécessitent un banc d'essai spécifique. Le projet européen SOLABS du 6^e PCRD a abouti à un prototype de façade solaire intégrée qui est en test au SPF.
5. **Un «insolateur» artificiel a été installé.** L'homogénéité du flux solaire a été prouvée par un scanner *ad hoc*. Après une période de montage minutieux, il fonctionne à satisfaction et les premières mesures indépendantes de la météo ont débuté. Une validation de l'outil et une certification officielle sont prévues pour 2007. L'insolateur sera doté d'un nouveau système de mesure des absorbeurs.
6. **Les couches anti-réfléctives sont au point,** mais le rapport coût/bénéfice limite leur pénétration du marché des capteurs.
7. **Les collecteurs à tubes sous vide représentent toujours 30% du marché des tests.** La plupart viennent de Chine pour obtenir un label *Solar Keymark* qui leur ouvre les portes du marché européen. Les coûts de ces capteurs sont plus bas que ceux produits en Europe, mais la qualité aussi, pour le moment.
8. **Le facteur IAM (*Incident Angle Modifier*)** est mesuré pour tous les capteurs et surtout pour les tubes sous vide (Figure 2). Un travail de diplôme a montré que la norme actuelle ne prend pas en compte tous les effets combinés des 2 angles (inclinaison et orientation) correctement, notamment pour les capteurs à concentrateur parabolique complexe (CPC). Les discussions en Europe sur ce point vont recommencer.
9. **Les équipements informatiques** du SPF sont très sollicités et constamment surveillés. Les mesures se déroulent de façon permanente et continue. La publication en ligne des résultats de test et la possibilité de comparaison sont très appréciées des utilisateurs du site www.solarenergy.ch. L'automatisation depuis la saisie des données jusqu'au rapport final sur le site est fonctionnelle. Les manuels et aides en ligne sont encore en préparation pour répondre à l'importante demande des utilisateurs.
10. **13.L'accréditation** ISO 17025 du laboratoire (STS 301) court jusqu'en mai 2007 et devra être renouvelée. Une nouvelle accréditation selon EN 12976 a été obtenue. La norme de capteurs EN 12975 : 2006 est entrée en vigueur. Elle est en régression malheureusement pour les exigences de qualité, mais elle demande désormais une valeur du coefficient de conversion optique du capteur « η_o » dépassant 80% ! La caractéristique d'un capteur doit désormais comprendre une courbe dite de *Peak power*. La tendance générale cependant a donné moins d'importance aux tests de composants, mais plus aux performances des systèmes.
11. **L'interprétation de la norme est toujours variable selon les labos.** Une coordination avec le Portugal et la Grèce a été lancée sur ce point.
12. **Mesures d'ensoleillement** : un *round-robin* test avec des laboratoires européens a permis de re-calibrer les équipements du SPF.



Querschnitt durch einen CPC-Kollektor.

Simulierter Winkelfaktor für den in Abbildung-4 dargestellten CPC-Kollektor. Stark strukturierter Winkelfaktor für Winkel im Bereich zwischen den longitudinalen beziehungsweise transversalen Winkelfaktoren.

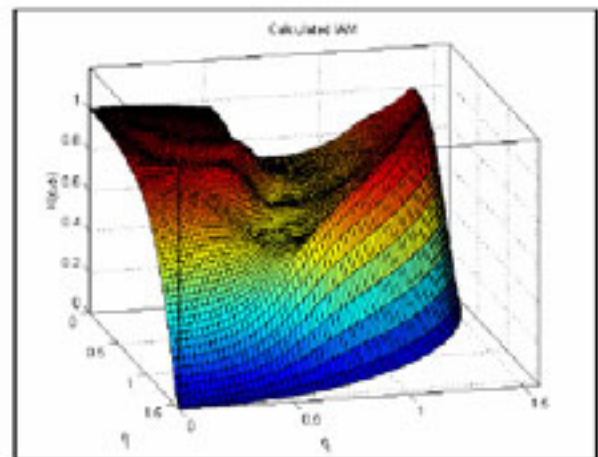


Figure 2 : Incident Angle Modifier mesuré sur un capteur à tubes sous vide avec concentrateur parabolique complexe (CPC) (source : SPF).

13. La cuve en plexiglas équipée d'une détection de vitesses de particules n'a pas pu être rendue fonctionnelle durant l'année.

MATÉRIAUX

1. Les travaux de la nouvelle Tâche 39 du Programme *Solar Heating and Cooling* de l'AIE «**Polymeric materials for Solar thermal applications**» ont débuté. Elle vise à étudier le recours aux polymères dans toutes les parties d'une installation solaire.
2. La certification de verres adaptés au solaire et dits «*Solarglas*» développée au SPF rencontre un écho important en Europe. Douze verres ont été soumis au SPF en 2006. Seuls trois ont réussi le test.
3. Les tests de dégazage dans les capteurs soumis à de hautes températures ont permis de trouver un isolant spécial à base de laine de verre qui a supporté une température de 260 °C. Les capteurs avec verre anti-réfléctif atteignent en stagnation cette température.
4. Les tests de fluides caloporteurs ont été poursuivis (Figure 3). Ils s'achèveront en 2007 avec un rapport à chaque fabricant qui participe aux tests.
5. Un protocole de tests des soudures au laser a été élaboré.
6. Des travaux sont réalisés par le SPF pour l'industrie solaire avec clause de confidentialité. Deux projets CTI sont menés par le SPF en collaboration avec 2 industries suisses.
7. Le site internet www.solarenergy.ch reçoit en moyenne plus de 400 visiteurs par jour. C'est la vitrine du SPF. Il est un vecteur de diffusion des informations du SPF autrefois distribuées en classeurs et lors de l'achat de *Polysun*. Le support de *Polysun* fonctionne via un abonnement.

Cuiseur thermique ultra-léger et pliable [6]

Le cuiseur solaire léger a été testé autour du monde (Figure 4). Il a tout d'abord été amélioré quelque peu et a vu sa puissance augmentée grâce à une astuce pour la casserole devenue sélective à peu de frais et grâce au recours à un paravent. Avant les tests, des simplifications mécaniques ont encore été apportées. Un atelier de jeunes chômeurs a produit une petite série du cuiseur, ce qui a permis de résoudre d'autres problèmes de technique de production encore non rencontrés lors de l'élaboration de prototypes uniques. Après la présentation du cuiseur sur deux foires et sur internet, une petite vingtaine a été vendue à prix réduit à des personnes pour test lors de voyages lointains. Ces personnes ont été



Figure 3 : banc test de pompe solaire au SPF (source: SPF).

questionnées à la fin de l'été et leurs expériences analysées.

L'analyse montre que le cuiseur plaît aux personnes qui connaissent déjà la cuisine solaire et qui ont un certain «flair technique», mais qu'il ne s'agit pas encore d'un produit pour un «grand public», car, d'une part, il faut connaître les difficultés de la cuisine solaire et, d'autre part, le montage de 2 à 6 minutes paraît encore trop long, même s'il est en fait très rapide pour un habitué. Le *design* a, par contre, été bien perçu par tous les utilisateurs et cela est un facteur important : le cuiseur plaît. Des améliorations techniques sont possibles, au vu de l'expérience ; le *marketing* doit être mieux organisé.

Nouveaux matériaux : des verres de couleur pour le solaire

Le LESO de l'EPF de Lausanne travaille sur des multicouches minces interférentes qui donnent la possibilité d'envisager des verres qui apparaissent colorés par réflexion tout en gardant des propriétés de transmission solaire acceptable. En 2006 les travaux suivants ont pu être accomplis [5, 19]:

- Les couches minces sont composées de SiO_2 et TiO_2 mais aussi de fluorures (MgF_2) et de films minces de nano-composites fluorure/oxyde. L'indice de réfraction du verre avec dépôt peut être prédit et choisi selon les couches qui seront déposées.
- Un nouveau mélange Mg-F-Si-O a montré un indice de réfraction particulièrement bas, ce qui en fait un candidat idéal pour les applications solaires. Les propriétés optiques ont pu être mesurées avec les équipements de partenaires du projet (ellipsométrie et microscope électronique, Figure 5).
- La production par procédé sol-gel, mis au point dans ce projet depuis 2003 au LESO, de verres de format A4 a été réalisée de manière courante, en différentes couleurs et

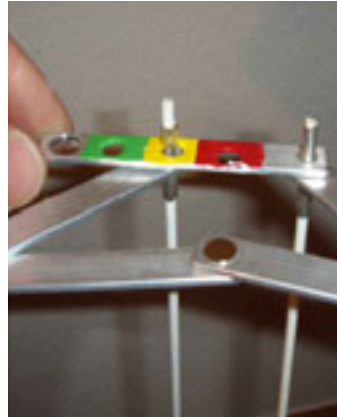


Figure 4 : le cuiseur solaire extra léger et pliable a été testé autour du monde. Illustration de gauche: test en camping dans le sud de l'Europe. Milieu: astuce de montage selon la hauteur du soleil. Droite: sélectivité de la casserole et couverture transparente pour une augmentation importante de la température. Source : Götz.

en conservant une homogénéité de toute la surface, sans défauts à l'analyse.

- Une boîte de démonstration a été réalisée, qui permet de visualiser le rendu d'une couleur dans un simili capteur solaire.
- Le durcissement accéléré des films aux UV s'est révélé intéressant tant pour la longévité que pour les économies d'énergie du processus. Une technique a été établie et testée, avec le sècheur UV combiné avec l'étirement sol-gel.
- Des architectes et façadiers ont été contactés pour définir les intégrations possibles de futurs capteurs avec verre de couleur.

En parallèle et en concertation avec le LESO de l'EPFL, l'Université de Bâle travaille également sur des nanostructures pour colorer les verres, mais déposables selon un procédé de *sputtering* [21]. L'équipe de l'Université de Bâle a pu caractériser des oxydes ternaires, tel $Ti_xSi_{(1-x)}O_y$, en réflexion optique pendant le processus de déposition. La modélisation est également parfaitement conforme à la mesure. Un partenaire verrier a été approché et les premiers tests ont pu commencer en usine avec un équipement de *magnetron sputtering*. La mise au point a débuté pour des verres de 1.90 x 3.0 m.

Outils solaire et étude de la ressource solaire [13]

La ressource étant fluctuante, il convient de vérifier périodiquement que nos modèles, tels *Meteonorm*, basés sur des valeurs du passé de 20 ans, sont toujours valables. Le but du projet *Solar ressource Knowledge Management*, qui est la Tâche 36 du Programme *Solar Heating and Cooling* de l'AIE, est de rendre accessibles aux utilisateurs potentiels les données de gisement solaire sur tout le globe sous une forme unifiée, précise, complète et simple à utiliser. Ces données peuvent être des archives, des valeurs générées par logiciel,

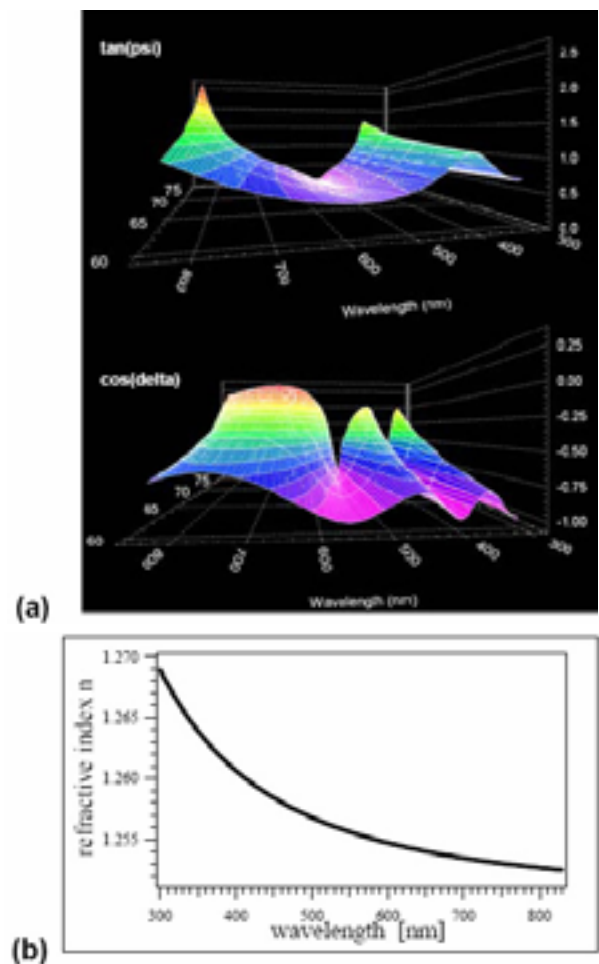


Figure 5 : détermination par ellipsométrie de l'indice de réfraction du film de nano-composite Mg-F-Si-O : (a) mesures ; (b) indices de réfraction prédits par la simulation (source : LESO PB).

des valeurs de satellite ou des prévisions. 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 de

façon relativement satisfaisante, ce n'est pas le cas lors d'utilisation d'années spécifiques, notamment pour l'indice de clarté. Par ailleurs, la répartition dynamique simulée de celui-ci peut être améliorée. Il en va de même pour les températures estivales qui ne correspondent pas exactement aux valeurs mesurées, notamment pour l'année exceptionnelle 2003 (pointe de demande de climatisation) ; de plus, les différences entre zone urbaine et rurale doivent être mieux simulées. La version 6.0 de *Meteonorm* devrait ainsi être plus proche de la réalité récente.

Dans cette Tâche 36, une enquête a été lancée de façon à mieux quantifier les archives existantes et à définir les besoins des utilisateurs, par le biais d'un questionnaire sur internet. Les résultats de cette enquête guideront la suite du projet pour les points les plus importants, à savoir, fournir les données dont l'utilisateur a besoin et préciser leur forme.

Outils de simulation : *Polysun 4* [4]

Polysun 4.0 a été mis en vente en 2006 en trois versions (*light*, *designer*, *pro*). Le logiciel a été promis lors du Symposium OTTI et de la Foire *Intersolar* en Allemagne. Plus de 600 licences ont pu être vendues. Le manuel de l'utilisateur a été amélioré, ainsi que les documents de programmation pour faciliter l'échange de personnel (Figure 6). Des tests comparatifs entre *Polysun 4.0* et *Polysun 3.3* ont été positifs. Chaque utilisateur peut désormais définir son système et le simuler. Des versions spéciales pour deux entreprises du solaire ont en outre été réalisées. *Polysun 4.0* est disponible comme la version 3.3 en 5 langues et désormais en portugais également.

Un modèle de capteurs non vitrés a été introduit dans *Polysun 4.0*, et les relations avec *Meteotest*, pour les données *Meteonorm*, et avec le LFEM/EMPA, pour le logiciel *Helios* qui est intégré à *Polysun*, ont été intensives pour finaliser la version 4.0 qui représente une nouvelle étape pour le logiciel de par sa flexibilité nouvelle.

Une discussion quant à la privatisation d'une partie des activités liées à *Polysun* a débuté entre le SPF, la HES de Rapperswil et l'OFEN qui est à l'origine du programme et qui a supporté son développement de manière continue depuis 15 ans. On vise un *marketing* plus poussé pour une augmentation de la promotion, des canaux de distribution et, partant, des ventes.

Le programme de simulation des absorbeurs *Absorber-master* a été enrichi avec le calcul de l'amortissement éventuel du choix d'un meilleur absorbeur et la prise en compte de la perte de sélectivité au droit de la soudure au laser. Des corrections de problèmes signalés par les utilisateurs ont été faites, preuve que le SPF est à l'écoute des clients du solaire.

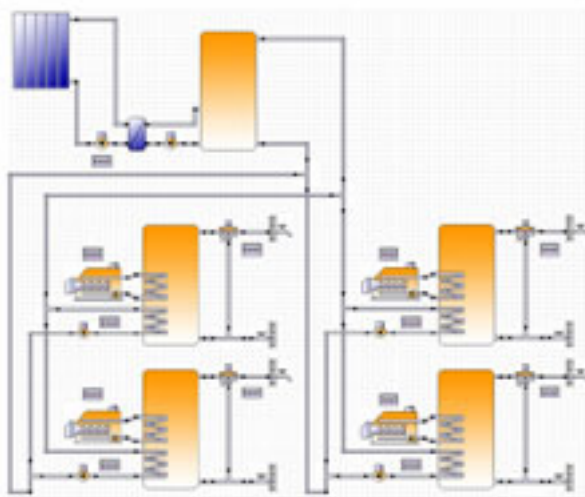


Figure 6 : un système solaire pour le collectif, typique de l'Espagne, avec préparation décentralisée d'eau chaude sanitaire, que la version *Designer* de *Polysun 4.0* peut désormais définir et simuler (source : SPF).

SYSTÈMES ET INSTALLATIONS SOLAIRES POUR LE BÂTIMENT

Systèmes combinés : mesures et optimisation [2, 11, 24]

1. **Systèmes combinés**: dans le cadre de la Tâche 32 du Programme *Solar Heating and Cooling* de l'AIE, le SPF s'est attaché à déterminer les meilleures solutions de systèmes solaires combinés avec stockage en cuve à eau. Les contraintes principales sont la réduction du coût total, la simplicité et le maintien de la performance. Un système de stockage sans pression et avec une distribution à débit variable a fait l'objet d'une étude théorique de simulation avec *TRNSYS* qui a montré l'intérêt des concepts testés. Une solution de vidange du circuit solaire, même en présence d'une pompe étanche, a été testée.
2. **Le banc test de système combiné avec appoint de granulés** a été mis en fonction. En coordination avec le programme «Bois» de l'OFEN un projet *Pelletsolar* a débuté. Il s'agit de mesurer une installation typique et de l'optimiser en détail durant 2007. Une séquence complète de 12 jours a été effectuée. L'efficacité de la chaudière à granulés a varié de 80 à 85% à charge complète. En tenant compte des pertes thermiques, la valeur tombe à 60%. En comportement non stationnaire, la consommation électrique nécessaire à la pré-ventilation du foyer peut être non négligeable. Dès lors, le dimensionnement correct du stock solaire et tampon prend tout son intérêt. C'est ce comportement intermittent qui doit être particulièrement mesuré, car peu de données existent pour le moment pour les chaudières à granulés.

3. **Un banc de test de pompe solaire** dans une mini boucle solaire a été construit. On s'intéresse surtout aux pompes à palettes très utiles pour le *low flow*, mais dont la durabilité n'est pas prouvée.
4. **Un seul système pour eau chaude sanitaire a pu être certifié en 2006.** Le banc de test «toiture à 45°» a été totalement modifié pour accueillir 4 systèmes simultanément et devenir plus flexible pour tester sur le toit du SPF notamment les thermosiphons qui reviennent à la mode et tous les systèmes *in situ*. La norme européenne EN 12976, base du label *Solar Keymark* étant en vigueur, cela entraînera une demande accrue pour ce genre de tests. Les logiciels de gestion de toutes les mesures ont été également revus.

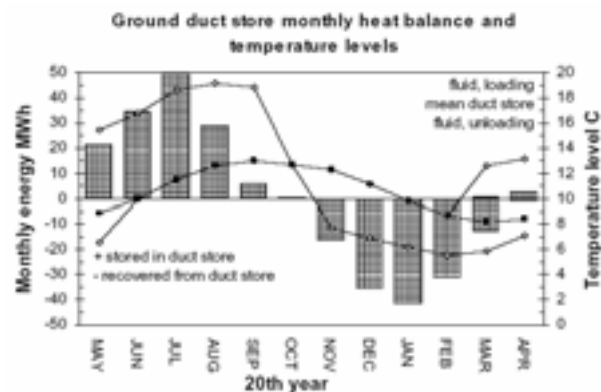


Figure 7 : exemple de sortie du logiciel *Bridgesim* pour la simulation d'un pont dégivré par un stock saisonnier diffusif. Le bilan et les températures de la 20^e année de fonctionnement (source : LEEE).

STOCKAGE DE CHALEUR

Optimisation d'une installation de stockage saisonnier diffusif [8, 20]

L'objectif de ce projet est de pouvoir simuler et optimiser l'installation pilote de Serso, à Därlingen, où l'on dégivre un pont depuis 1998 avec de l'énergie solaire et avec un stockage saisonnier de chaleur dans le terrain. Le stock comporte 91 sondes de 65 m espacées de 3 m. Un modèle de l'installation a été validé sur les 2 ans de mesures disponibles. Un modèle de capteur simulant le fonctionnement du pont en mode captage et en mode distribution de la chaleur pour le dégivrage a été mis au point à satisfaction.

Un logiciel spécifique dénommé *Bridgesim* a été développé sur la base de ce travail (Figure 7). Il simule un pont à dégivrer à partir d'un stock souterrain diffusif avec un circuit doté d'un stock tampon en cuve à eau.

Le logiciel effectue le bilan thermique d'une configuration de système et permet une analyse paramétrique sur tous les principaux paramètres d'une telle installation. Il est basé sur *TRNSYS* et est analogue au logiciel *Pilesim* pour les pieux de fondation que le LEEE de la SUPSI a développé précédemment dans notre programme de recherche. Le travail est aussi basé sur les résultats des mesures du projet *Dock Midfield* à Zürich, qui montre une très bonne adéquation avec les prédictions de simulation [20].

Stock journalier pour le rafraîchissement de locaux [9, 17, 18]

Le «déphaseur thermique diffusif» a également reçu le nom de *coolshift* pour sa capacité à stocker du frais la nuit pour le jour, par exemple, dans une installation de ventilation. Les travaux de 2006 ont apporté de bons résultats et produit plusieurs publications de renommée internationale :

- Le caisson de mesures et la méthode de mesures, surtout celle d'interprétation en série de Fourier, ont été très bien mis au point. Le paramètre clé, à savoir le coefficient d'échange convectif air-solide, peut être déduit des mesures. À partir de la mesure et grâce au modèle développé, le dimensionnement de la longueur permettant le déphasage souhaité de 12 h est possible.
- La solution des tubes à eau est la plus performante, en permettant de réduire de 40% le volume par rapport à une solution en billes de ciment ou en plaques de terre cuite, avec 0.6 m³ de stock par 100 m³/h d'air seulement et avec des pertes de charge raisonnables. La construction d'une unité compacte sans intervention manuelle (actuellement il s'agit de tubes remplis à la main) devrait être étudiée avec un industriel, par exemple, de l'extrusion de plastiques
- le stockage en plaques de ciment est plus difficile à cerner par la théorie et des incertitudes sont encore à lever en 2007, mais la solution est plus simple à mettre en œuvre que l'eau. La partie théorique (rappelons qu'il s'agit d'une découverte) est désormais très bien maîtrisée par le CUEPE. Un prototype sera testé dans une installation de ventilation durant 2007 avec des plaques Knauf de 22 mm d'épaisseur.
- Le CUEPE s'est lié avec le Groupe de compétences en mécanique des fluides et en procédés énergétiques de la Haute École de Genève. Une simulation CFD faite par ce groupe a montré un potentiel d'optimisation de la géométrie et de la répartition du flux d'air dans le déphaseur (Figure 8). Les travaux devront être poursuivis avec des financements complémentaires pour donner toute chance au prototype qui sera testé en 2007 dans une installation de ventilation réelle à Genève.

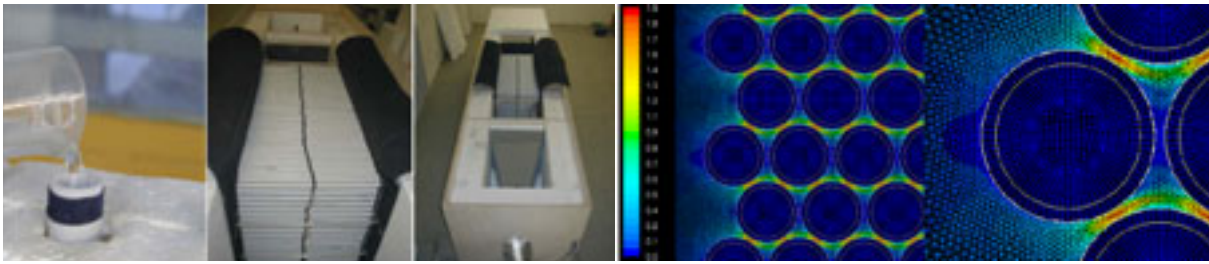


Figure 8 : un nouveau caisson expérimental avec 0.25 m³ de stock a été élaboré et utilisé ici avec la variante de tubes à eau et modélisation CFD d'un coolshift stock diffusif en tubes (source : CUEPE, CMEFE).

Stockage dense de chaleur pour l'habitat

Les solutions de stockage pour les systèmes combinés permettant de faire mieux que l'eau, soit en densité, soit en réduction de pertes thermiques, soit avec une double prestation double chaud en hiver / froid en été, sont de plus en plus recherchées en Europe. Nous avons été précurseurs avec la Tâche 32 du Programme *Solar Heating and Cooling* de l'AIE.

Advanced storage concept for solar and low energy buildings [11]

La Tâche 32 du Programme *Solar Heating and Cooling* de l'AIE (www.iea-shc.org) regroupe huit pays autour de la problématique du stockage solaire pour l'habitat. Elle a démarré en 2003 et se terminera en fin 2007. En 2006, les travaux ont avancé dans les 4 types de stockage qui sont étudiés :

Stockage chimique et par sorption : 6 projets sont étudiés. Les résultats décevants du pilote de 1000 kg de silicagel *Modestore* ont été analysés. L'équipe autrichienne a montré que le silicagel ne permet pas de réaliser un stockage efficace, la charge s'effectuant correctement en été, mais la décharge ne procurant pas des augmentations de température suffisantes pour être utilisable. Le matériau ne convient pas. Une équipe allemande travaille à la recherche de nouveaux matériaux

plus adaptés au vu de l'expérience acquise, mais cette recherche fondamentale ne débouchera pas sur des applications avant plusieurs années. Le projet *Monosorp* de Stuttgart est quant à lui prometteur : un stock prototype de 1 m³ de zéolithe extrudé en test pour vérifier si la théorie développée les années précédentes est validée. Le projet NaOH du LFEM/EMPA a pu rejoindre cette Tâche 32 en cours d'année.

Stockage dans des matériaux à changement de phase (PCM) : 6 projets sont en cours.

Au Danemark, on tente de montrer qu'un stock saisonnier par 10 m³ de PCM pour une villa est possible grâce au phénomène de surfusion. En Suisse, le projet *CoSyPCM* a montré des résultats décevants pour le PCM, notamment du fait du transfert de chaleur dans le matériau. En Espagne, l'équipe s'attache à améliorer cet effet.

Stockage dans les cuves à eau: l'équipe danoise a fait un important travail de recherche d'optimum dans les dispositifs d'aide à la stratification. L'équipe allemande cherche à simplifier le circuit hydraulique d'une installation combinée ; il en est de même en Suisse où une solution de cuve sans pression a été étudiée (Figure 9).

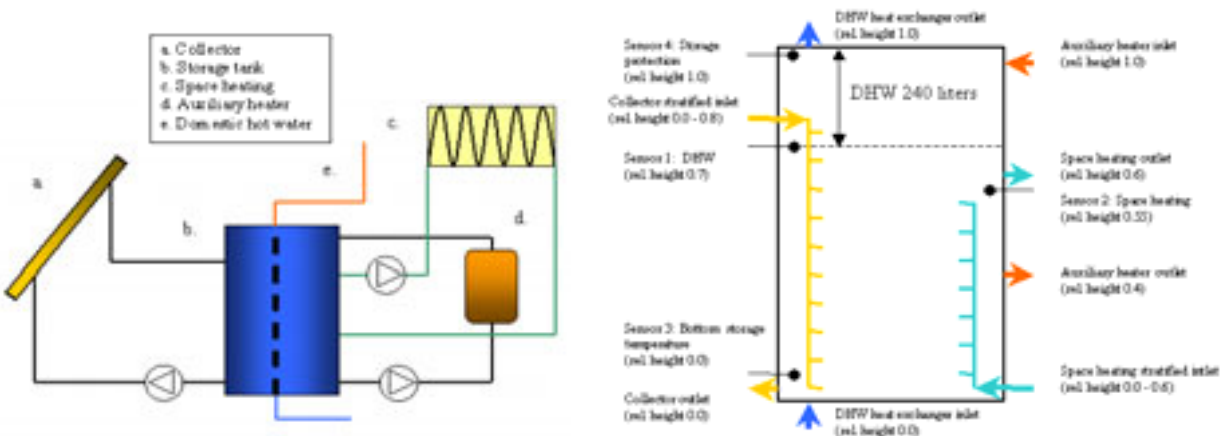


Figure 9 : simplification extrême d'un système solaire combiné, avec drain back et avec une cuve sans pression et avec un système d'injection directe dans le chauffage à débit variable ; le système est plus simple et plus performant ; il faut encore le tester en pratique (source : SPF) [24].

L'année 2007 sera déterminante pour la synthèse des résultats de cette Tâche 32 du Programme *Solar Heating and Cooling* de l'AIE qui a d'ores et déjà remis permis de remettre en lumière la thématique du stockage en Europe. Le document de cette Tâche sur l'état de la technique de stockage à court terme, publié en 2005, est en vente régulière via le site internet de la Tâche [23].

Stockage par procédé de sorption

Le SPF travaille sur un procédé de stockage long terme par sorption avec de la «zéolithe 13X» (de 1 à 2 mm de diamètre) et le «silicagel 490» [7]. Un dispositif expérimental permet d'étudier les caractéristiques de charge et de décharge d'un lit poreux de ces matériaux parcouru par un flux de vapeur d'eau.

La vitesse du front de charge au travers d'un lit poreux augmente avec la taille des particules de zéolithe et avec la pression partielle d'eau dans la cuve. La vitesse maximale atteinte est de 6.5 mm/s, cela pour un diamètre de particule de 2.5 mm et sous une pression de 30 mbar à 25 °C. Les vitesses d'adsorption et les capacités sont désormais connues pour les 2 matériaux étudiés.

Le dilemme entre puissance de décharge et énergie stockée est une nouvelle fois au centre de l'optimisation. En effet, pour obtenir une puissance suffisante aussi après avoir atteint la saturation de surface du sorbent, il est nécessaire de disposer d'un matériau très poreux. Malheureusement la densité énergétique diminue avec la densité et aussi avec la porosité du matériau support. Le «silicagel 490» a un diamètre de pores de 9 nm et une densité de 400 kg/m³; les valeurs pour la «zéolithe 13X» sont de 0.9 nm et de 650 kg/m³.

La durée de fonctionnement du lit poreux est également un paramètre clé. Après un jour, la puissance que l'on peut extraire devient très faible (Figure 10).

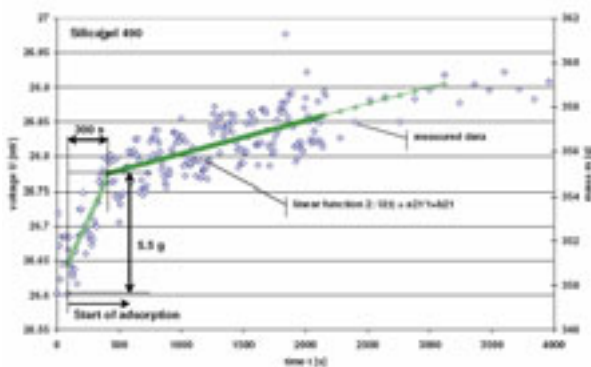


Figure 10 : adsorption d'eau dans un lit de «silicagel 490» ; on observe dès apparition de la saturation une nette diminution de gain ; la saturation a lieu après 300 s contre 400 s pour la «zéolithe 13X» (source : SPF).

Stockage avec matériaux à changement de phase (PCM) [10]

Le projet *CoSpyPCM* de la HEIG-VD à Yverdon fait partie de la Tâche 32 du Programme *Solar Heating and Cooling* de l'AIE. Les travaux réalisés en 2006 ont été les suivants :

- Le modèle numérique (différences finies explicites) d'un stock avec changement de phase dans *TRNSYS* a été complété par la prise en compte de l'effet de la convection interne au PCM à l'état liquide au moyen du coefficient de transfert diffusif de Nusselt. Cela est nécessaire pour les PCM peu visqueux, telle la paraffine, mais moins nécessaire pour l'acétate de sodium.
- Le modèle a été validé sur des mesures en laboratoire à la HEIG-VD à Yverdon et sur des mesures réalisées par l'Université de Graz et transmises à Yverdon dans le cadre de la Tâche 32.

Une installation solaire combinée a été testée en laboratoire sans et avec PCM, dans des bouteilles en aluminium supportant 1 bar de pression différentielle externe (Figure 11). Deux PCM sont utilisés : l'un en partie haute (température de fusion 58 °C), l'autre en partie basse (température de fusion 27 °C). La part volumique de PCM qui a pu être placée dans le dispositif imaginé a été de 21% en partie haute et de 14% en partie basse. Au total, la part PCM ne représente que 12% du volume de la cuve. La simulation reproduit très bien les mesures.

- le modèle de simulation a été ensuite utilisé pour une étude paramétrique : l'introduction de PCM ne permet pas un gain significatif sur la fraction annuelle solaire dans la configuration étudiée. L'une des raisons en est la lenteur de la diffusion dans le PCM qui limite les puissances absorbées par le PCM et soutirables du PCM.
- une analyse du cycle de vie d'une installation solaire combinée avec et sans PCM a été faite en NRE (*non renewable energy*) et GWP (*global warming potential*). On en a conclu que les impacts supplémentaires sont de l'ordre de grandeur des avantages énergétiques procurés.

Ce projet a montré les difficultés liées à l'introduction d'un PCM dans une cuve et les limites de l'intérêt d'une telle solution dans le cas d'un système, tel *Arpège* où le brûleur est intégré à la cuve.

L'étude se poursuit dans la recherche de l'usage optimal du PCM, soit pour l'eau chaude sanitaire uniquement, soit pour le froid solaire.

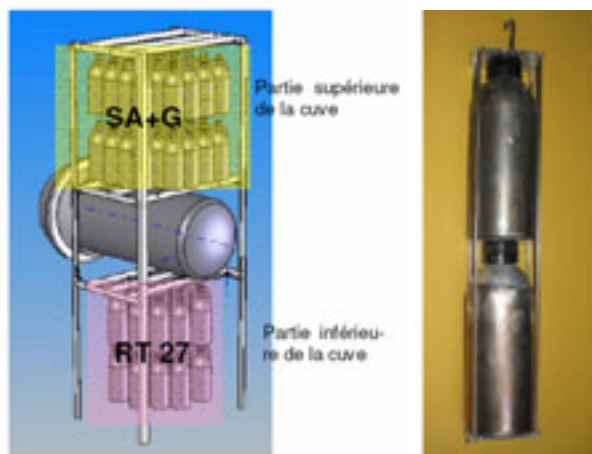


Figure 11 : 2 types de PCM introduits dans une cuve de système solaire combiné (SA+G = acétate de sodium avec poudre de graphite, RT27 = paraffine) et récipients utilisés (source : LESBAT).

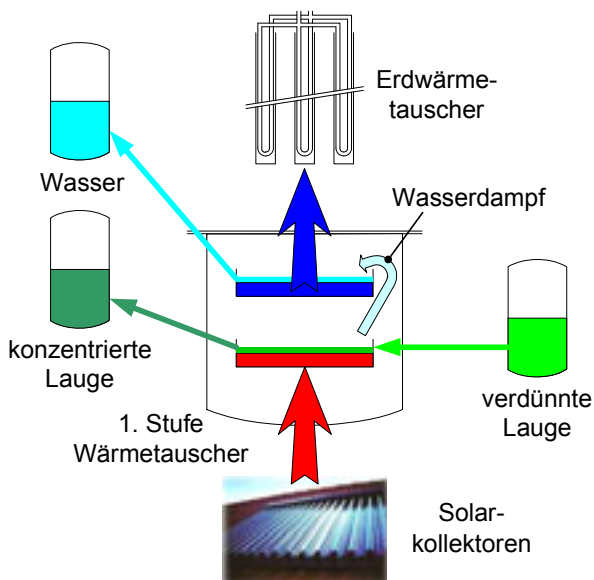
Stockage et transport de froid [12]

L'objet de cette étude de faisabilité était de valider la faisabilité d'une production – en continu – d'un coulis permettant de transporter et de stocker du froid et d'en évaluer ses caractéristiques thermodynamiques et son bilan énergétique. Un nouveau banc d'essais est conçu et réalisé. L'installation a permis de mesurer les propriétés du coulis et de valider les principes d'une nouvelle méthode de production de coulis que l'équipe de la HEIG-VD à Yverdon avait estimée possible en débutant dans cette recherche. La densité du coulis obtenu est de 1034 kg/m^3 . L'enthalpie est de l'ordre de 570 kJ/kg qui est en accord avec la littérature. Le coulis pourrait avantageusement remplacer les fluides frigorigènes actuels. La nature du coulis ne peut être pour le moment dévoilée, un brevet étant en dépôt. La poursuite des travaux se fera également dans un projet CTI avec un partenaire industriel déjà très intéressé.

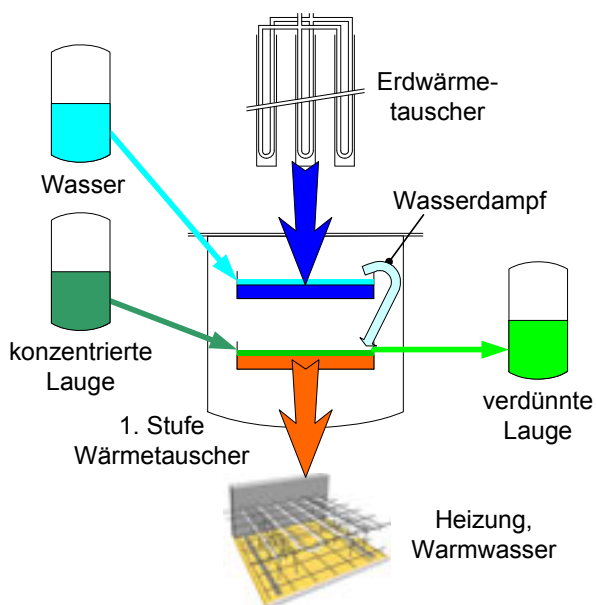
Stockage thermochimique [14]

Le stockage par procédés chimiques est prometteur. Le LFEM/EMPA a débuté une recherche sur un prototype de stockage chimique depuis 2004; en 2006, notre programme a pu y apporter un complément (Figure 12). L'idée du LFEM/EMPA est d'utiliser la soude caustique (NaOH) comme matériau de stockage. Le matériau possède les caractéristiques essentielles d'un stock chimique pour l'habitat. Pour un usage de 70°C à 20°C la densité de stockage est le triple de celle de l'eau, ce qui permet un espoir de stock saisonnier de taille raisonnable (8 à 10 m^3) pour une villa à basse consommation pour autant qu'une source de chaleur à basse température, telle des sondes géothermiques, puisse être disponible en hiver. Les premières mesures thermiques sur le prototype de 200 L et avec 1 kW d'échangeur, réalisés

en laboratoire, sont meilleures qu'attendues, avec une température de charge de 120°C au lieu de 150°C ! Par contre les effets corrosifs du produit sur l'élastomère de tuyaux immergés se montrent plus rapides que prévus. Un démontage pour une reconstruction avec une isolation encore plus importante est prévu. Les buts du prototype n° 1 ont été atteints.



a : charge en été



b : décharge en hiver

Figure 12 : le procédé de stockage thermochimique testé au LFEM/EMPA (source : EMPA).

Stockage saisonnier de grande envergure dans le sol [15]

Le projet que représente le bâtiment de la SUVA à Root possède le plus grand stock saisonnier de Suisse ($340'000 \text{ m}^3$ avec une capacité de $1'000$

MWh) et est en service depuis 2 ans. Le rapport final est disponible. Il montre que :

- après une phase de mise au point facilitée par l'équipement de mesures de l'OFEN, l'installation fonctionne
- le centre du stock évolue très peu entre 10 et 12 °C, et le stock s'est refroidi d'environ 2.4 °C durant les 2 premières années (Figure 13). L'amplitude de travail du stock est très faible : 2.5 °C.

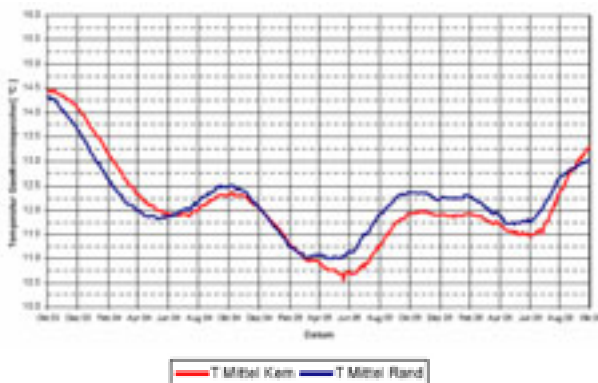


Figure 13 : évolution de la température du stock du bâtiment de la SUVA entre octobre 2003 et octobre 2005 (source : PB).

- Durant le cycle 2, ce sont 743 MWh solaire et de récupération qui ont été injectés et 483 MWh qui ont été soutirés par la pompe à chaleur (cycle 1 : 508 contre 650 MWh soutirés).
- Les 660 m² d'absorbeurs sélectifs ont produit 45 MWh durant le cycle 1 et 72 MWh durant le cycle 2. La productivité de 110 kWh/m²•an est loin de ce qui est encore possible. Il reste à optimiser le fonctionnement de l'installation pour en tirer le meilleur, d'autant que le complexe de bâtiments va être agrandi.

Le suivi de cette installation sera poursuivi par les moyens propres de la SUVA, car il y a encore beaucoup à gagner. L'installation est la plus grande de Suisse et le niveau de complexité est relativement élevé. Il est normal qu'une phase d'optimisation ait lieu comme pour toute grande installation. Réjouissant est le fait que le stock fonctionne bien dans l'ensemble. Cette installation sert d'exemple à d'autres projets entrepris notamment en Allemagne, permettant ainsi au savoir-faire créé en Suisse depuis 20 ans dans le domaine du stockage souterrain de s'exporter.

Collaboration nationale

Le SPF travaille avec deux industriels du secteur solaire dans des projets CTI et reçoit de nombreuses demandes de conseil et de tests de la part des fabricants de capteurs solaires suisses.

Les centres de compétences que nous soutenons (SPF, HEIG, CUEPE, LESO, LEEE) collaborent avec des industriels nationaux dans leur projet.

Collaboration internationale

Le SPF collabore à deux Tâches du Programme *Solar Heating and Cooling* de l'AIE : la Tâche 32 sur le stockage de chaleur et la Tâche 39 sur les polymères. Le SPF fait partie des projets NEGST et SOLABS du 6^e PCRD de l'UE.

Le SPF est présent dans les conférences solaires européennes pour présenter ses travaux et *Poly-sun*. Les collaborations naissent à cette occasion.

Dans la Tâche 32 que nous dirigeons, les apports des partenaires internationaux sont importants pour nos équipes. Durant 2006, la conférence internationale *Ecostock'06* s'est déroulée à Stockton College aux USA et notre Tâche 32 a présenté 10 papiers ! [11].

Projets pilotes et de démonstration «Solaire actif – chaleur»

(Urs Wolfer, BFE/OFEN)

Im Jahre 2006 konnte nur ein Projekt [102] abgeschlossen und eines neu aufgenommen werden. Gesamthaft umfasst das Programm 5 Projekte. Im Sinne des *CORE-Konzeptes der Energieforschung des Bundes* wurde der Bereich der solaren Kühlung erweitert, indem die beschränkten Mittel in ein derartiges Projekt investiert wurden.

Solare Kühlung, Weingut Schloss Salenegg [104]

Eine 15-kW-Absorptionsanlage der Firma EAW wurde in eine bestehende Solaranlage zur Heizungsunterstützung mit einer Kollektorfläche von 70 m² und einen Speichervolumen von 3'200 Liter eingebunden (Figur 14). Die Anlage versorgt das anliegenden Wohngebäude und die Wein-

herstellung mit Warmwasser. Die Heizungsunterstützung wird auch zur Temperaturregulierung des Weinlagers in den Wintermonaten verwendet. Die solare Kühlung dient ausschliesslich für die Kühlung des Weintanklagers mit einer Kühllast von 4.4 kW. Eine Erweiterung zur Kühlung des Flaschenlagers ist vorbereitet.

Erste Messungen zeigen, dass die Anlage noch ein erhebliches Optimierungspotenzial aufweist. Dies sowohl bei der Systemintegration als auch bei den Zusatzaggregaten. Die Betriebsoptimierung wird innerhalb des gesteckten Projektrahmens nicht beendet werden können.



Figur 14: Absorptionsmaschine Weingut Schloss Salenegg (Quelle: EAW WEGARCAL 15).

Évaluation de l'année 2006 et perspectives pour 2007

Les tests de capteurs se sont déroulés à satisfaction. La mise en route du simulateur solaire, un outil important, s'est bien déroulée grâce à l'implication des personnes en charge au SPF. Le banc test de système combiné solaire-pellets sera un bon outil pour les années à venir où la demande pour cette combinaison devrait exploser. Les équipements du SPF sont l'un de ses atouts et 2006 a vu une amélioration notable des possibilités de tests. La collaboration avec d'autres centres de recherche doit être maintenue et si possible développée avec les pays émergents de l'Est et de l'Orient.

Les verres solaires colorés progressent. La dimension de 1 ou 2 m² est l'étape suivante, en association avec un industriel.

Le stockage est la clé du solaire. La Tâche 32 du Programme *Solar Heating and Cooling* de l'AIE a été créée par nous dans le but de trouver de nouvelles pistes. Elles peinent à se dessiner, mais certaines qui étaient inconnues ont été explorées malheureusement sans succès notable ; la recherche c'est aussi cela ! Nous attendons en 2007 des résultats plus positifs, mais peut-on les décréter ?

Le très grand stock du bâtiment de la SUVA a été planifié il y a près de 10 ans et nous avons désormais les résultats : il est fonctionnel ! On peut améliorer encore le circuit de charge pour tirer le maximum des capteurs solaires. Ce sera fait en dehors de notre programme qui a atteint son but en ce qui concerne les stocks diffusifs souterrains avec pompe à chaleur : dimensionnement (phase de recherche de 1990 à 2000) et construction (projet P+D depuis 2000) corrects. L'installation de la SUVA est une base pour le bureau d'ingénieurs qui exporte son savoir faire acquis grâce aux

programmes de l'OFEN depuis 20 ans (stockage de chaleur et géothermie). Les logiciels *PileSim* et *BridgeSim* développés dans nos programmes de recherche sont aussi un aboutissement cohérent de ces travaux.

Ecostock'06 nous a montré que les projets de stock solaire souterrain avec des sondes sans pompe à chaleur démarraient au Canada (projet *Drake Landing* pour 100 maisons en cours d'exploitation). Nous regrettons qu'en Suisse aucune construction de taille importante ne se décide pour ce genre de solution. L'absence de soutien public par des fonds P+D est une des raisons.

Le logiciel *Polysun 4.0* a été terminé, validé, diffusé et se vend bien ! Il convient désormais de réussir la nouvelle phase décidée par le SPF de privatisation d'une partie des activités liées au logiciel. Nous perdons des chercheurs de qualité et le marché est restreint ; cela pourrait être un problème.

Il serait bon que nos équipes déposent plus de projets européens dans le cadre de l'appel d'offres du 7^e PCRD de l'UE qui s'ouvre. Les projets européens peuvent être porteurs, car ils regroupent les meilleures équipes et des moyens appropriés nouveaux.

Une ouverture vers le froid solaire est également planifiée, le marché allant être demandeur dans les années à venir ; certainement le marché du Sud de l'Europe, mais en Suisse ?

Dans l'ensemble notre programme correspond aux objectifs de la CORE, est cohérent, repose sur les bonnes équipes et produit des résultats chaque année dans le sens d'une amélioration de la productivité des capteurs solaires et, dans une moindre mesure, d'une diminution des coûts spécifiques.

Liste des projets de R+D

(RA) Rapport annuel 2006 existant

(RI) Rapport intermédiaire existant

(RF) Rapport final existant (voir www.recherche-energetique.ch pour les numéros de publication entre parenthèses). Les rapports peuvent être téléchargés à partir de notre site : <http://www.solarenergy-thermal.ch/>

Solaire actif – chaleur

- [1] A. Bohren, L. Konersmann, A. Luzzi (info@solarenergy.ch) SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie • **Teil A : Komponenten in solarthermischen Systemen** (RA 2006) <http://www.solarenergy.ch/>
- [2] P. Vogelsanger, S. Laipple, L. Konersmann, S. Brunold, A. Luzzi, (info@solarenergy.ch) SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie • **Teil B : thermische Solarsysteme** (RA 2006) <http://www.solarenergy.ch/>
- [3] S. Brunold, F. Flückiger, L. Konersmann, A. Bohren, A. Luzzi (info@solarenergy.ch) SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie • **Teil C : Materialien in solarthermischen Systemen** (RA 2006) <http://www.solarenergy.ch/>
- [4] A. Mathez, A. Witzig, A. Luzzi (info@solarenergy.ch) SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie • **Teil D : Informatik** (RA 2006) <http://www.solarenergy.ch/>
- [5] A. Schüler, E. de Chambrier, C. Roecker, J.-L. Scartezzini, LESO EPFL: **Colored solar collectors** – (RA 2006) <http://www.lesowww.epfl.ch/>
- [6] M. Götz, D. Philippen, M. Götz technologie douce : **Projet cuiseur solaire ultra-léger II – Pré-série de 30 cuiseurs** – Rapport final 30 octobre 2006 et 9 annexes (RF 2006) <http://www.cuisinesolaire.com>

Stockage de chaleur

- [7a] P. Gantenbein, A. Luzzi (info@solarenergy.ch) SPF/HS-Rapperswil: **Sorptionsspeicher: Leistung / Druckverlust / Betriebsart** (RA 2006) <http://www.solarenergy.ch/>
- [7b] P. Gantenbein (info@solarenergy.ch) SPF/HS-Rapperswil: **Sorptionsspeicher: Leistung / Druckverlust / Betriebsart** (RI 2006 September) <http://www.solarenergy.ch/>
- [8] D. Pahud, SUPSI-DCT-LEEE Canobbio: SERSO, stockage saisonnier de l'énergie solaire pour le dégivrage d'un pont. **Optimisation de l'installation par calage d'un outil de simulation dynamique sur les mesures existantes** (RA 2006) <http://www.lee.dct.supsi.ch>

Annexe 1 : Simulation du stockage de chaleur dans le terrain de l'installation Serso et calibrage sur deux ans de mesure, 15 pages
Annexe 2 : Simulation du système complet et calibrage sur les mesures, 18 pages
Annexe 3 : BRIDGESIM, a simulation tool for the system design of bridge heating for ice prevention with solar heat stored in a seasonal ground duct store, 24 pages
- [9] P. Hollmüller, B. Lachal, CUEPE Genève: **Déphaseur thermique – Optimisation et prototype intégré** (RA 2006) <http://www.cuepe.ch>
- [10] S. Citherlet, J. Bony, HEIG-VD/LESBAT Yverdon: **CoSyPCM Combi-système avec Matériaux à changement de phase** (RA 2006) <http://www.heig.ch>
- [11] J.-C. Hadorn, BASE consultants SA, Lausanne: **IEA SH&C Task 32 Advanced storage concepts for solar and low energy buildings – Annual report of the operating agent** (RA 2006) <http://www.baseconsultants.com/IEA32>
- [12] Osmann Sari, Jin Hu, Frédéric Brun, Nicolas Erbeau, IGT HEIG-VD, **Projet Transport et Stockage de froid** (RF 2006 confidentiel), 53 pages
- [13] P. Ineichen, CUEPE UNI Genève : **Solar resource management SHC Task 36**, RA 2006, 3 pages
- [14] R. Weber, EMPA : **NAOH-Speicher für saisonale Wärmespeicherung**, RA 2006, 4 pages

Liste des projets P+D «Stockage de chaleur»

- [15] P. Berchtold, E. Wirz, B. Engsig, M. Frei, PB Büro Sarnen : **Geothermiespeicher SUVA D4 Unternehmens- und Innovationszentrum, Root (LU)** (Projet P+DB, RA 2004 – 2005 -2006) <http://www.aramis-research.ch/e/14779.html>

Références

- [16] J.-C. Hadorn : **Points clés du programme « Solaire actif chaleur et stockage de chaleur »** (Document de synthèse pour le programme 2008-2011, révision décembre 2006)
- [17] P. Hollmuller, B. Lachal, Jean-Marc Zraggen, CUEPE Genève: A new ventilation and thermal storage technique for passive cooling of buildings: thermal phase-shifting - **PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006** (Art 2006), 6 pages, <http://www.cuepe.ch>
- [18] Pierre Hollmuller 1), Joyce Carlo 2), Martin Ordenes 2), Fernando Westphal 2), Roberto Lamberts 2), 1) Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE) Université de Genève – Switzerland, 2) Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE) Universidade Federal de Santa Catarina – Brazil, Potential of buried pipes systems and derived techniques for passive cooling of buildings in Brazilian climates, Art 2006, 26 pages, CUEPE Ed.
- [19] A. Schueler LESO, JC Hadorn, J. Wellstein (Red.) : **Viele bunte Kollektoren** – Revue Erneuerbare Energie 2006, 2 pages
- [20] D.Pahud, LEEC SUPSI Canobbio, M. Hubbuch, Hochschule Wädenswil: **Mesures et optimisation de l'installation avec pieux énergétiques du Dock Midfield de l'aéroport de Zürich** – Mars 2006 (RI 2006), 58 pages
- [21] P. Oelhafen, IfP Uni Basel, Materialien für Nachhaltige Technologien in der Energieumwandlung und Energieeinsparung. Development of nanostructured materials for solar technology: Colored cover glazings for thermal solar collectors, RF 2006, Dezember 2006, 5 pages
- [22] P. Hollmuller, B. Lachal, CUEPE : **Déphaseur thermique diffusif – Optimisation et prototype intégré** – RF 2006 – Décembre 2006 - 16 pages, <http://www.cuepe.ch>
- [23] J.-C. Hadorn Editor, **Thermal storage for solar and low energy buildings, State of the Art**, June 2005, IEA SHC Task 32, 170 pages, www.baseconsultants.com/IEA32 (book on sale)
- [24] SPF/HS-Rapperswil: Martino Poretti, Prof. Aldo Steinfeld, Supervisor: P. Vogelsanger: **Direct Feed Flow Controlled Solar Combisystem with Non-pressurized Storage: a Simulation Case** (Diplomarbeit 2006), Feb. 2006, 116 Seiten, <http://www.solarenergy.ch/>

Liste des projets P+D «Solaire actif : chaleur»

NB : La numérotation commence à 100.

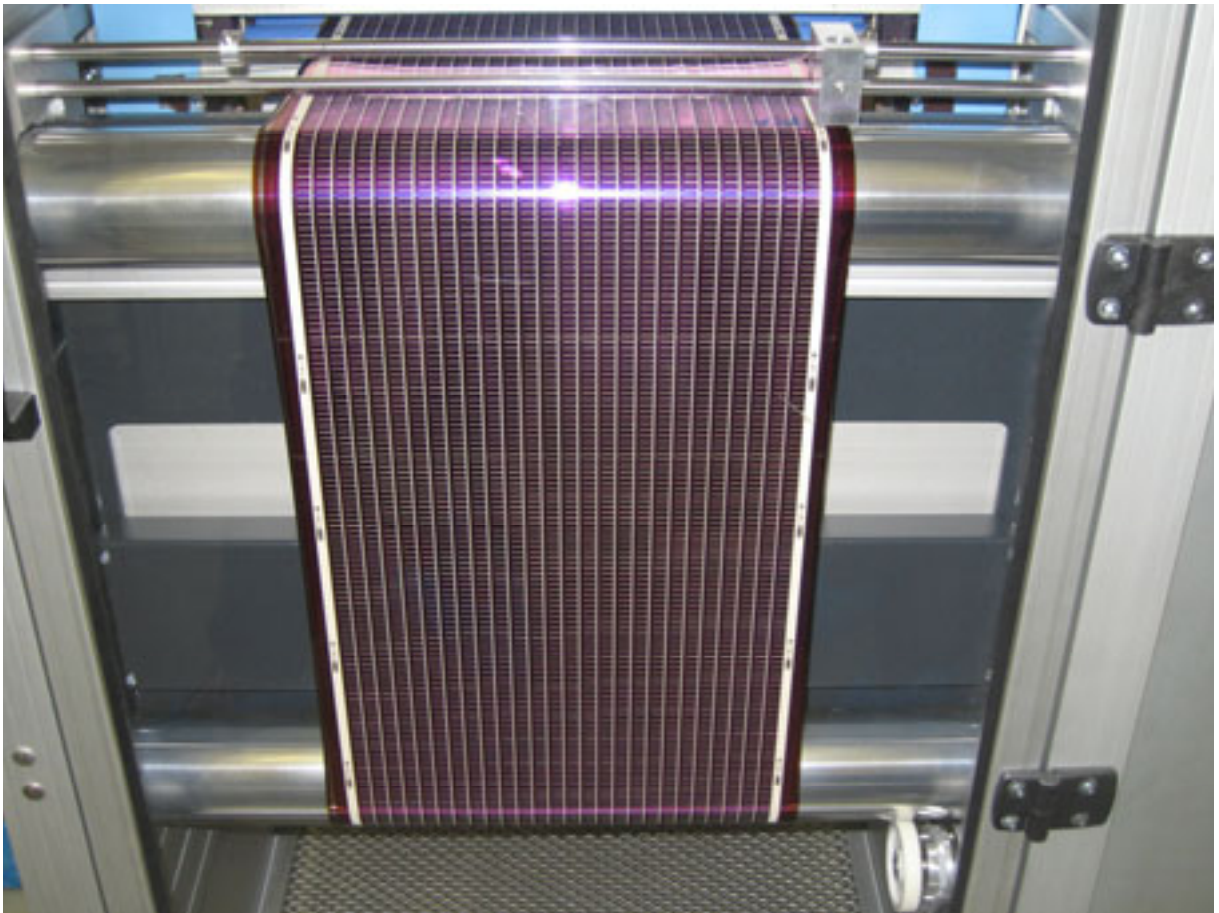
- [100] A. Primas, (aprimas@bhz.ch), BASLER & HOFMANN AG, Zürich: **Sanierung der Warmwasserversorgung Gemeinnützige Baugenossenschaft Zürich 7 (GBZ 7)**; Die geplanten Anlagen sind erstellt, Messungen laufen.
- [101] A. Reinhard, (a.reinhard@prospective-concepts.ch), prospective concepts ag, Glattbrugg: **Hybride autonome Energieversorgung mit Photovoltaik, thermischen Sonnenkollektoren, Flüssiggas-Blockheizkraftwerk und Holz, Veytaux**; Projekt unterbrochen wegen Schadenfall am Gebäude.
- [102] L. Engeler, (info@sesolar.ch), SALERNO ENGELER GMBH, Langenbruck: **Solmat frostschutzmittelfreie Warmwassererwärmung** (RF).
- [103] T. Bruttin, (thierry.bruttin@sierre.ch), VILLE DE SIERRE: **Complexe sportif Guillamo**; Anlage in Betrieb, Messkampagne läuft
- [104] Bernd Sitzmann (sitzmann@oekozentrum.ch), Ökozentrum Langenbruck, Langenbruck, **Solare Kühlung, Weingut Schloss Salenegg**; Anlage in Betrieb, Messungen laufen

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM PHOTOVOLTAIK

Stefan Nowak

stefan.nowak@netenergy.ch



Vom Technologie Start-up Unternehmen zur industriellen Investition

VHF-Technologies, ein Start-up Unternehmen des IMT, Universität Neuenburg, aus dem Jahr 2000 wurde im Verlauf von 2006 als strategische Investition des grössten europäischen Solarzellen Herstellers Q-Cells ausgewählt. In einem ersten Schritt wird eine Pilotfertigung dünner und flexibler Solarzellen von 2 MWp Produktionskapazität aufgebaut (*Bildquelle: NET*).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Programm Photovoltaik stand im Jahr 2006 im Spannungsfeld zwischen neuen und wachsenden Industrieprojekten, weiterhin knappen Mitteln für die Forschung, insbesondere im Bereich der P+D-Projekte, sowie der anhaltenden energiepolitischen Diskussion, bei welcher gerade die Photovoltaik immer wieder im Zentrum stand. Durch die breite Programmabstützung im Bereich der Forschung konnte das Niveau wenigstens hier weitgehend 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 2006 ca. 50 Projekte, wobei alle bekannten Projekte mit einer Förderung der öffentlichen Hand berücksichtigt sind.

Gestützt auf das *Energieforschungskonzept* der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE [38] verfolgt das Schweizer **Photovoltaik Programm in der Periode 2004 – 2007** die folgenden wesentlichen Ziele [39]:

- Es soll eine weitere Kostenreduktion 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 fokussiert auf die Schwerpunkte **Silizium** (amorph, mikrokristallin), Zellen auf der Basis von **Verbindungshalbleitern** (CIGS) sowie **Farbstoffzellen**. **Neue Konzepte** (Materialien und Prozesse) 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. Solarzellen auf flexiblen Substraten gewinnen zunehmend 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 **Inselanlagen** 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 neuen grossen EU-Projekten fortge-

setzt 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**).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

ZELL-TECHNOLOGIE

Die **grosse Bandbreite der Schweizer Solarzellenforschung** konnte im Berichtsjahr 2006 dank der breiten Abstützung dieser Forschung mit Erfolg fortgesetzt werden. Die Beteiligung an EU-Projekten des 6. Rahmenforschungsprogramms bildete eine wichtige Komponente; im Berichtsjahr konnten hier neue Projekte im Bereich der Dünnschicht Solarzellen begonnen werden. Damit ist die Schweiz nun an den meisten laufenden *Integrierten Projekten* der Europäischen Kommission im Bereich der Photovoltaik direkt oder indirekt beteiligt.

Dünnschicht Silizium

Die Entwicklungen im Bereich des Dünnschicht Siliziums finden an der Universität Neuchâtel (IMT), an der EPFL (CRPP), der Haute Ecole Arc ingénierie (Le Locle), dem NTB (Buchs) sowie bei den Unternehmen *oerlikon* (vormals *Unaxis*, Trübbach und Neuchâtel) und *VHF-Technologies* (Yverdon) statt und stellen einen wichtigen Schwerpunkt des Photovoltaik Programms dar.

Das IMT an der Universität Neuchâtel setze im Berichtsjahr das Projekt zu **Silizium Dünnschicht Solarzellen** [1a] fort. Die Ziele dieses BFE-Projektes bestehen 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 werden 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 erfolgt primär mit den Unternehmen *oerlikon* und *VHF-Technologies*, welche ihrerseits die am IMT entwickelten Prozesse in ihre Produkte implementieren. Folgende Resultate wurden im Berichtsjahr erreicht:

Auf der transparenten Oxydschicht (*Transparent Conductive Oxide - TCO*) aus ZnO auf Glas konnten p-i-n mikrokristalline ($\mu\text{c-Si:H}$) Solarzellen mit einem Anfangswirkungsgrad von 9.99% hergestellt werden. Dies stellt für *LPCVD* (*low pressure chemical vapor deposition*) einen Rekordwert dar. Amorphe p-i-n Solarzellen erreichten ihrerseits

den guten Anfangswert von 10.2%, solche aus mikromorphem Silizium 11.8%. Bei den Arbeiten zu Kunststoffsubstraten wurde ein besonderes Augenmerk auf die mikrokristalline Zelle gelegt. Auf dem Kunststoff PEN (Polyethylennaphtalat) wurde mit diesem Material ein Anfangswirkungsgrad von 8.3% erzielt. Für amorphe Zellen auf PET (Polyethylenterephthalat) wurden 7.8% erreicht. Wichtige Grundlagenarbeiten sowie Fortschritte betrafen die TCO-Schichten aus ZnO. In Bezug auf die Analytik wurden verschiedene Messmethoden weiterentwickelt und automatisiert, z.B. für Messungen der Strom-Spannungskennlinie, der spektralen Empfindlichkeit, des Dunkelstroms oder für Infrarotmessungen. Parallel dazu wurde die Laborinfrastruktur durch ein neues, automatisiertes Doppelkammer-Depositionssystem ergänzt (Fig. 1).

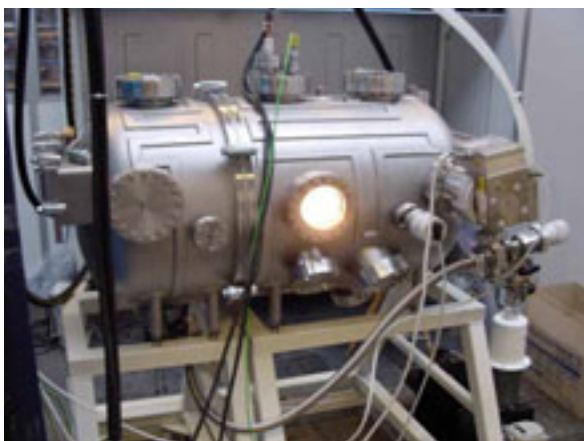
Das KTI-Projekt in Zusammenarbeit mit *oerlikon* für den **Prozess der schnellen Abscheidung von mikrokristallinem Silizium** [1b] auf der Grundlage der KAI Plasmadepositionsanlagen wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Damit wird die Grundlage für den grossflächigen (1.4 m^2), industriellen Prozess für mikromorphe Solarzellen gelegt. Auf der Versuchsanlage am IMT konnten im Berichtsjahr mikrokristalline Silizium Solarzellen mit 8.4% Wirkungsgrad hergestellt werden; bei *oerlikon* wurden damit mikromorphe Mini-Module ($10 \times 10 \text{ cm}^2$) mit einem Wirkungsgrad von 9.5% erreicht. Mit den Resultaten dieses Projektes konnte gezeigt werden, dass die ursprünglich für Flachbildschirme konzipierte KAI Depositionsanlage für die industrielle Herstellung von Dünnschicht Solarzellen verwendet werden kann.

Das CRPP an der EPFL hat zusammen mit *oerlikon* das verwandte KTI-Projekt eines neuen, grossflächigen **VHF-Reaktors für die Abscheidung von amorphen und mikrokristallinen Siliziumsolarzellen** ebenfalls abgeschlossen [2]. Es werden Plasmaanregungsfrequenzen bis 100 MHz untersucht, was eine schnelle Abscheidung ($\geq 4 \text{ Å/s}$) erlaubt, jedoch für die Homogenität der Schichten auf einer Fläche von $\geq 1 \text{ m}^2$ besondere Herausforderungen darstellt. Das Schlussresultat besteht aus einem Hochfrequenzreaktor, in welchem amorphe und mikrokristalline Siliziumschichten auf einer Fläche von 1 m^2 schnell und mit einer Gleichmässigkeit von 5-10% hergestellt werden können.

Ein weiteres KTI-Projekt zwischen dem IMT und *oerlikon* zur **Stabilität der transparenten Oxydschichten** (TCO) aus ZnO in laminierten Solarzellen [1c] wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Die Dampf-Wärme Prüfung der IEC Tests für Solarmodule (IEC 61646: 1000h @ 85°C & 85% rel. Feuchtigkeit) wurde bestanden. Damit konnte gezeigt werden, dass die LPCVD TCO-Schicht unter adäquater Verpackung die Anforderungen an die notwendige, langfristige Zuverlässigkeit erreicht. Das NTB in Buchs schloss die Arbeiten des KTI-Projektes für ein auf die industrielle Produktion ausgerichtetes, spektral aufgelöstes **Photostrom Messgerät** (*Spectral Response Measurement System SRMS*) [3] zusammen mit *oerlikon* erfolgreich ab. Die Projektziele wurden erreicht, indem auf Solarmodulen vollflächige Messungen mit stabilen Resultaten durchgeführt und entsprechende Bilder dargestellt werden können. Diese verschiedenen KTI-Projekte bilden, zusammen mit den regulären Arbeiten am IMT, die Grundlage für die industrielle Umsetzung in Hinsicht auf Produktionsanlagen für Silizium Dünnschicht Solarzellen durch *oerlikon*.



Figur 1: Aufbau des Dünnschichtsilizium-Doppelkammer-Depositionssystems auf der CIGS Dünnschicht Solarzellen (Bildquelle: ETHZ) Grundlage der KAI-M plasma box von *oerlikon* (Bildquelle: IMT).



Figur 2: Depositionssystem zur Hochskalierung der CIGS Dünnschicht Solarzellen (Bildquelle: ETHZ).

Das IMT und *VHF-Technologies* arbeiten seit Herbst 2005 im neuen EU-Projekt **FLEXCELLENCE** [1d] am Thema der flexiblen Solarzellen auf Kunststoffsubstraten weiter. Zum ersten Mal erfolgt dabei im Bereich der Photovoltaik eine EU-Projektkoordination durch einen Schweizer Partner (IMT). Im ersten Berichtsjahr betrafen die Arbeiten des IMT die Entwicklung von mikrokristallinen Silizium-Schichten hoher Qualität und hohen Depositionsraten auf 30x30 cm² grossen Substraten in einem VHF Prozess. Es wurden Depositionsraten von 2 nm/s bei guten Schichteigenschaften erzielt. Anhand dieser Resultate soll ein Vergleich mit alternativen Produktionsverfahren erfolgen. Die Arbeiten von *VHF-Technologies* befassen sich mit den erreichbaren Modulkosten bei der industriellen Umsetzung im grösseren Stil. Mit amorphen Silizium Solarzellen von 5% Wirkungsgrad könnten demnach bei 50 MW Produktionskapazität Kosten von unter 0.8 €/Wp erreicht werden.

Das IMT nahm im Berichtsjahr die Arbeiten zum EU-Projekt **ATHLET** [1e] auf. Dieses, vom HMI in Berlin koordinierte, über 4 Jahre laufende *Integrierte Projekt* – das europaweit bisher grösste Forschungsprojekt zu diesem Thema – befasst sich mit zwei Technologien im Bereich der Dünnschicht Solarzellen, der mikromorphen Solarzelle und der CIS-Technologie (siehe unten). Das Projekt strebt Modulkosten von 0.5 €/Wp an. Für mikromorphe Tandemzellen lautet das Ziel 10% stabiler Wirkungsgrad bei einer Fläche von 1 m² und 10 Å/s Depositionsrate. Das IMT befasste sich im ersten Jahr mit den Arbeiten zu Solarzellen kleiner Fläche sowie der Hochskalierung bis zum KAI 1200 Reaktor (1.4 m² Fläche) von *oerlikon*. Dabei erfolgen Zwischenschritte über die Reaktoren KAI-S (35 x 45 cm²) und KAI-P (45 x 55 cm²).

Kristallines Silizium

Die EMPA in Thun untersucht im neuen KTI-Projekt **SIWIS** [4] in Zusammenarbeit mit *HCT Shaping Systems* die Mechanismen, welche bei Drahtsägen von dünnen Waferscheiben zu Oberflächendefekten führen können, um daraus entsprechende Modelle zu entwickeln. Übergeordnetes Ziel des Vorhabens ist die Herstellung von Wafers unter 100 µm Dicke für die Produktion von kristallinen Siliziumsolarzellen.

HCT Shaping Systems setzte im Berichtsjahr die Beteiligung am EU-Projekt **BITHINK** [5], in welchem hocheffiziente bifaciale kristalline Solarzellen entwickelt werden (Wirkungsgrad 16+16%), erfolgreich fort. Dabei kommt sowohl Material vom Czochralski-Typ wie multikristallines Silizium zum Einsatz. HCT befasst sich im Projekt einerseits mit dem Thema der Herstellung dünner Wafer, wobei als Zielparameter die Anzahl Wafer pro Meter festes Silizium betrachtet wird. 3000 Wafer pro Meter Silizium wurden bisher erreicht, das

Ziel ist 3500 – 4000 Wafer/m. In einer bifacialen Solarzelle führt dies, je nach Annahme, zu einem Siliziumbedarf von lediglich 4.3 - 5.9 g/Wp. Andererseits wird die maschinelle Handhabung und weitere Verarbeitung der so hergestellten sehr dünnen Wafer untersucht.

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. Im Berichtsjahr wurde die erste Phase des BFE-Projektes **FLEXCIM** [6a] zur Entwicklung von flexiblen CIGS-Solarzellen abgeschlossen. Diese flexiblen, 5 x 5 cm² grossen CIGS-Solarzellen wurden auf Polyimid- und Metallfolien entwickelt. Dabei gelangte die an der ETHZ entwickelte Verwendung von Natrium zum Einsatz, wodurch Wirkungsgrade von 10-12% regelmässig erreicht werden konnten. Der früher auf Polyimid erzielte Weltrekord für den Wirkungsgrad von flexiblen Solarzellen auf Kunststoff von 14.1% stellt noch immer den höchsten erreichten Wert dar. Im Berichtsjahr wurde an der Hochskalierung des Prozesses auf 30 x 30 cm² gearbeitet. Dazu wird ein neues, industriell ausgerichtetes Depositionssystem aufgebaut (Fig. 2). Als Zwischenresultat liegt ein Mini-Modul von 16 cm² mit einem Wirkungsgrad von 7.9% vor. Als weiteres Substrat für die flexiblen CIGS-Solarzellen wurde Aluminium untersucht; dieses stellt ein neues Gebiet mit grossem Anwendungspotenzial dar. Der Depositionsprozess muss dafür aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten auf tiefere Temperaturen ausgelegt werden. Die beste Solarzelle auf Aluminium erreichte bisher einen Wirkungsgrad von 6.6%; dabei wurde noch kein Natrium eingesetzt.

Das EU-Projekt **LARCIS** [6b] 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. Zudem wurden im Berichtsjahr die Arbeiten zum EU-Projekt **ATHLET** [6c] aufgenommen (vgl. oben). Die Gruppe Dünnschichtphysik ist in diesem *Integrierten Projekt* an zwei Arbeitspaketen zu CIGS-Solarzellen beteiligt. Im Vordergrund stehen ergänzende Entwicklungsarbeiten für flexible Solarzellen auf Polyimid; dabei werden insbesondere 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.

Das ETHZ Spin-Off Unternehmen **FLISOM** [40] zur industriellen Umsetzung der flexiblen CIGS-

Solarzellen wurde im Berichtsjahr verschiedentlich ausgezeichnet, so z.B. mit dem ZKB-Pionierpreis des Technoparks Zürich oder der Auszeichnung als *Technology Pioneer* des *World Economic Forum* WEF.

Farbstoff und organische Solarzellen

Die Entwicklung von farbstoffsensibilisierten, **nanokristallinen Solarzellen** [7a] wurde am 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. In Langzeitmessungen an den neusten Zellkonzepten während 1000 Stunden bei AM1.5 Strahlung und 80°C konnten 97.7% der Anfangsleistung nachgewiesen werden. Die Laborzellen selbst erreichten einen Anfangswirkungsgrad von 10.1%.

Das ISIC schloss das KTI-Projekt zusammen mit *Greatcell Solar* zur **Erhöhung der Zellenspannung von Farbstoffzellen** [7b] ab. Eine wesentliche Rolle spielt dabei der eingesetzte Farbstoff, welcher diesbezüglich weiter entwickelt wurde. Über *Greatcell Solar* besteht zudem eine direkte Verbindung zum australischen Technologieunternehmen *Dyesol* [41], welches im Dezember 2005 eine Produktionsfirma für Farbstoffzellen in Griechenland angekündigt hat.

Das EU-Projekt **MOLYCELL** [7c] wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Es befasste sich mit flexiblen organischen Solarzellen, wobei sowohl vollständig organische wie hybride nanokristallin-organische Solarzellen entwickelt wurden. An der EPFL standen letztere im Vordergrund, wobei dazu ein fester Heteroübergang zwischen nanokristallinen Metalloxyden und molekularen bzw. polymeren Löcherleitern gebildet wird. Prototypen mit dem Metalloxyd-organischen Hybridansatz erreichten auf Glassubstraten bei AM1.5 einen Wirkungsgrad von 4.2%. Auf flexiblen Metallfolien wurde auf kleiner Fläche (1 cm²) ein Wirkungsgrad von 3.6% ermittelt. Für vollständig organische Solarzellen konnte ein Wirkungsgrad von 5.5% bzw. ein zertifizierter Wert von 4.8% nachgewiesen werden. Die Arbeiten werden im neuen EU-Projekt **OrgaPVNET** fortgesetzt.

Solaronix beteiligt sich am EU-Projekt **FULL-SPECTRUM** [8], 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 und der spektralen Empfindlichkeit. Im Berichtsjahr konnte die Funktion des flachen Konzentrators demonstriert und ein Wirkungsgrad von 1.8% ermittelt werden. Nebst dem Wirkungsgrad muss auch die Stabilität der im Konzentrator verwendeten fluoreszierenden Farbstoffe verbessert werden.

Das LTC an der EPFL schloss das KTI-Projekt zusammen mit *Konarka* für **photovoltaisch aktive Textilien** auf der Grundlage der Farbstoffzellen [9] ab. Dabei wurden photovoltaisch aktive Fasern entwickelt, welche einen Anfangswirkungsgrad bis zu 5.5% erreichten. Die photovoltaischen Eigenschaften der Faser unter mechanischer Belastung wurden ermittelt und erste Prototypen von photovoltaischen Textilien hergestellt.

An der EMPA in Dübendorf wird im Labor für funktionale Polymere eine neue Aktivität für **organische Solarzellen** [10a] aufgebaut; diese grundlagenorientierten Arbeiten sind Bestandteil des EMPA Forschungsprogramms **Materialien für Energietechnologien**. Die experimentellen Arbeiten befassen sich mit der Nutzung von Cyanin Farbstoffen sowie mit der Nanostrukturierung des Übergangs zwischen Donor- und Akzeptor-Materialien. Dabei wird ein interpenetrierendes Netzwerk dieses Übergangs angestrebt. Diese Arbeiten sollen auch Bestandteil des durch die EMPA koordinierten nationalen CCEM-Projektes **ThinPV** [10b] sein, welches anfangs 2007 beginnt.

Antennen-Solarzellen

An der Universität Bern wurde die laufende Phase zu **Antennen-Solarzellen** [11] im Rahmen des Programms Solarchemie und mit Unterstützung des schweizerischen Nationalfonds abgeschlossen. Unter Verwendung von farbstoffbeladenen Zeolith-Kristallen wurde eine neue Variante farbstoffsensibilisierter Solarzellen angestrebt. Im Vordergrund dieser Grundlagenarbeiten stand die Organisation der Kristalle an der Grenzschicht zu einem Halbleitermaterial im Hinblick auf die elektronische Energieübertragung. Im Berichtsjahr konnten erstmals Antennensysteme aufgebaut werden, welche auf makroskopischer Ebene unidirektionalen Transport von elektronischer Anregungsenergie bewerkstelligen. Bei den farbstoffbeladenen Zeolith-Kristallen konnte die starke Lichtstreuung im sichtbaren Bereich durch Einbau in eine Polymermatrix reduziert werden. Dies kann auch für Fluoreszenz-Konzentratoren verwendet werden. Ein weiterer Bereich betrifft die Kombination von Antennensystem-Materialien mit organischen Solarzellen, wodurch eine bessere Lichtabsorption und damit ein besserer Wirkungsgrad möglich werden.

SOLARMODULE UND GEBÄUDEINTEGRATION

Gebäudeintegrierte Anlagen stellen nach wie vor das wichtigste 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 Solarstrombörsen häufig die kostengünstigsten Lösungen für Flachdachanwendungen zum Einsatz gelangen, 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 konnten (siehe auch Abschnitt P+D), verlagert sich die Entwicklung vermehrt auf das Solarmodul selbst.

Swiss Solar Systems (3S) schloss das BFE-Projekt zur Verwendung von geätztem **Antireflexglas** (AR) [12a] zur Leistungssteigerung von kristallinen Solarmodulen ab. Die Messungen an den mit diesem Glas hergestellten Solarmodulen zeigten in beiden Fällen eine systematische Leistungssteigerung von ca. 2%, die erwarteten 3% konnten somit nicht ganz bestätigt werden. Freiluftmessungen bei verschiedenen Einstrahlungswinkeln zeigen, dass die AR-Module den Grenzbereich mit flachen Einstrahlungswinkeln noch etwas besser ausnützen können, wobei dieser Effekt nicht abschliessend quantifiziert werden konnte. Seit Projektbeginn hat sich die Verwendung von geätzten oder beschichteten Antireflexgläsern in der Industrie vermehrt durchgesetzt. Im EU-Projekt **BIPV-CIS** [12b] sollen die Eigenschaften der Photovoltaik-Gebäudeintegration mit Dünnschicht Solarzellen verbessert werden. Auf der Grundlage von CIS-Zellen werden Dach-, Überkopfglas- und Fassadenelemente entwickelt. Für 3S steht die Entwicklung des Dachelementes im Vordergrund. Durch den boomenden Photovoltaikmarkt sind einige der Industriepartner in diesem Projekt stark ausgelastet, sodass das Projekt Verzögerungen erlitten hat. Neue Produktentwicklungen haben es unter diesen Verhältnissen nicht so leicht.

Vereinzelte neue Konzepte und Produkte zur Photovoltaik-Gebäudeintegration wurden im Rahmen von P+D-Projekten erprobt (siehe unten).

ELEKTRISCHE SYSTEMTECHNIK

Das **Schwergewicht in der Systemtechnik** liegt generell auf der Qualitätssicherung von Komponenten (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.

Das frühere Labor LEEE-TISO an der SUPSI wurde im Berichtsjahr zum Institut ISAAC (Istituto di Sostenibilità Applicata all'Ambiente Costruito) befördert. Es hat im Berichtsjahr seine Testmessungen an Solarmodulen im Projekt **Centrale LEEE-TISO 2003-2006** [13a] fortgesetzt. Das gemäss ISO 17025 für Messungen zertifizierte Labor mit dem Sonnen-Simulator der Klasse A erhielt im Juni 2006 die erneute offizielle Akkreditierung. Im Berichtsjahr wurden mehr als 4900 I-V Kennlinien (Blitztests) gemessen, was einer Steigerung von 88% gegenüber dem Vorjahr entspricht. Zudem fanden die jährlichen Vergleichsmessungen mit anderen zertifizierten Labors in Europa (ESTI-JRC und ECN) statt. Zur präziseren Messung von Dünnschichtmodulen wird eine gefilterte Referenzzelle verwendet, sowie die im Vorjahr eingeführte Korrektur für die spektrale Abweichung. Der im Vorjahr im Labor entwickelte MPPT (*Maximum Power Point Tracker*, Fig. 3) wurde an der Fachhochschule Burgdorf geprüft. Der statische Wirkungsgrad wurde dabei mit 99.75% bis 99.99% bestimmt, der dynamische beträgt 98.4%. Im Berichtsjahr wurden 28 Einheiten des neuen MPPT gebaut und am ISAAC installiert, sowie weitere 5 an der Universität von Lecce.

Bei den Aussenmessungen wurde im Berichtsjahr der 10. Testzyklus an 14 kommerziellen Modulen fortgesetzt (7 mc-Si, 3 sc-Si, 1 HIT, 2 a-Si, 1 CdTe). Bei den kristallinen Modulen kann über die

Jahre eine stetige Verbesserung der Übereinstimmung zwischen gemessener und deklarierter Leistung beobachtet werden. Die Dünnschichtmodule schneiden diesbezüglich noch besser ab. Das ISAAC hat im Berichtsjahr Arbeiten zur gebäudeintegrierten Photovoltaik aufgenommen. Zum einen wurde eine Marktübersicht erstellt und die Problembereiche für die Architekten analysiert. Zum anderen fanden Messungen der thermischen Leitfähigkeit von Solarmodulen und der Dämpfung nichtionisierender Strahlung (Elektrosmog) durch solche statt. Bei letzterem zeigten vor allem Dünnschichtmodule günstige Eigenschaften.

Das ISAAC ist Partner im EU-Projekt **PV Enlargement** [13b], welches ein europaweites Demonstrationsprojekt in 10 Ländern (5 davon in Osteuropa) mit 27 Anlagen von insgesamt 1.2 MWp Leistung darstellt. Ende 2006 waren davon insgesamt 25 Anlagen in Betrieb. Die wissenschaftlichen Arbeiten sind nahezu abgeschlossen. Am ISAAC wurden 151 Module mit 23 Modultypen (c-Si, a-Si, CIS, CdTe) aus Europa bezüglich der Anfangsleistung charakterisiert, 54 davon wurden nach 1-2 Jahren einer weiteren Messung unterzogen. Trotz besserer Übereinstimmung mit den deklarierten Werten besteht noch Verbesserungsbedarf zur Verwendung und Einhaltung der EU-Norm EN50380.

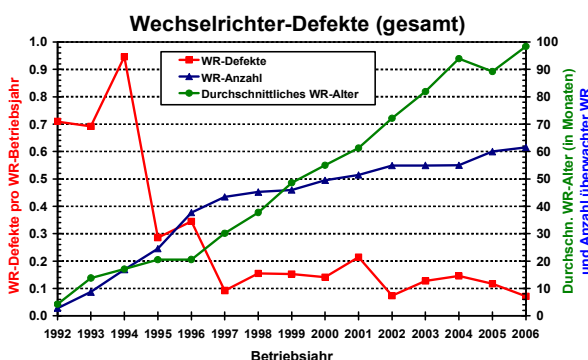
Das ISAAC nahm im Berichtsjahr die Arbeiten am neuen EU-Projekt **PERFORMANCE** (*A science base on PV performance for increased market transparency and customer confidence*) auf [13c]. Dieses, vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg koordinierte, 4-jährige *Integrierte Projekt* 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 Photovoltaik Modulen sowie der Modellierung beteiligt.

Wirkungsgrad und Jahresenergieproduktion von Photovoltaik Modulen sind auch Bestandteil eines Projektes am PSI [14a]. Aufgrund der Messungen an verschiedenen kommerziellen Modulen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen wird ein semi-empirisches Modell für den Wirkungsgrad parametrisiert. Daraus können Aussagen bei verschiedenen klimatischen Bedingungen gewonnen werden.

Am Photovoltaiklabor an der FH Burgdorf wurde das Projekt **Photovoltaik-Systemtechnik PVSYS** [15] fortgesetzt. Im Berichtsjahr konnte das neuentwickelte MPPT-Interface mit integrierter Kennlinienmessung in den Wechselrichter-Messplatz eingebunden werden. Damit steht nun eine effiziente Wechselrichter-Test-Infrastruktur zur Verfügung, mit der sich in einem Arbeitsgang Solargenerator-Kennlinie, DC-AC-Umwandlungswirkungsgrad, MPPT-Wirkungsgrad, totaler Wir-



Figur 3: Maximum Power Point Tracker am ISAAC (Bildquelle: NET)



Figur 4: Wechselrichter-Defekte pro Wechselrichter-Betriebsjahr (Bildquelle: FH Burgdorf).

kungsgrad und Stromoberwellen bestimmen lassen. Die Testbedingungen für den dynamischen MPPT-Test wurden etwas gelockert. Die 2005 entwickelte FI-Überwachungs-Prüfschaltung wurde an die neue Norm DIN VDE 0126-1-1 angepasst. Nach den in Solarmodulen von *BP-Solar* im letzten Jahr aufgetretenen Lichtbögen ist sich die Photovoltaik Branche der Gefahr durch DC-seitige Lichtbögen wieder vermehrt bewusst geworden. Deshalb wurden die 1993 – 1998 im Rahmen mehrerer Projekte (mit *Alpha Real AG*) entwickelten Lichtbogendetektoren wieder reaktiviert, einige neue Ideen entwickelt und ein Patentantrag eingereicht. Die Langzeitmessungen an diversen Photovoltaik Anlagen wurden fortgesetzt, insbesondere auch an der **Anlage Stade de Suisse Wankdorf**. Ebenso wurde die langjährige Wechselrichterstatistik weitergeführt (Fig. 4).

Enecolo klärt im Projekt **SIMIBU** basierend auf bisherigen Erfahrungen die Machbarkeit eines Wechselrichters mit integriertem Backup ab [16a]. Mit diesem Ansatz sollen für dezentrale Photovoltaik Anlagen Synergien und Mehrwerte geschaffen werden. Im Vordergrund stehen derzeit die technische Machbarkeit, die Marktanalyse, die Spezifikationen und die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen.

ERGÄNZENDE PROJEKTE UND STUDIEN

ESU-Services hat im Berichtsjahr mit einem **Update Photovoltaik Ecoinvent Data V2.0** begonnen [17]. Aufgrund von Lebenszyklusinventaren aktueller Photovoltaikprodukte werden neue Lebenszyklusanalysen (*Life Cycle Analysis – LCA*) erstellt. Damit wird das Ziel verfolgt, in der **Ecoinvent Datenbank** [42] möglichst aktuelle Umweltanalysen der Photovoltaikindustrie zu publizieren. Neben der Aufdatierung von mono- und multikristallinen Solarmodulen werden auch erstmals Daten für die Herstellung und den Betrieb von Dünnschichtmodulen (CIS und CdTe) erhoben. Das Projekt erfolgt in Zusammenarbeit mit der Europäischen Photovoltaik Industrievereinigung EPIA.

Enecolo ist am Projekt **ENVISOLAR** der Europäischen Weltraumagentur ESA beteiligt [16b]. Das Projekt hat 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. In der Schweiz besteht ein enger Bezug zum online Photovoltaik monitoring Dienst **SPYCE** [43], welchen *Enecolo* zusammen mit *Meteotest* betreiben.

Mit Unterstützung der interdepartementalen Plattform (SECO, DEZA, BAFU, BFE) zur Förderung der erneuerbaren Energien in der internationalen

Zusammenarbeit **REPIC** [44] hat das CUEPE an der Universität Genf ein Modul für die Photovoltaiksoftware **PVSYST** [45] erarbeitet, welches **Photovoltaik Wasserpumpen** [18a] simuliert. Das Programm ist in der Lage, sehr unterschiedliche Pumpentypen und Systemkonfigurationen zu simulieren. Das Projekt wurde im Berichtsjahr erfolgreich abgeschlossen.

Das PSI beteiligt sich im Rahmen des *Integrierten* EU-Projektes **FULLSPECTRUM** [14b] an den internationalen Arbeiten zum Thema der Thermophotovoltaik (TPV). Gestützt auf frühere Projekte bearbeitet das PSI in diesem Projekt im Modul zur Thermophotovoltaik 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.

In einer Machbarkeitsstudie klärt das LESO der EPFL das Potenzial von **Quantum Dot Konzentratoren** für die Photovoltaik ab [19]. Es wird untersucht, ob mit dieser neuartigen Methode grossflächige (lateral wirkende) Konzentratoren auf Gläsern realisierbar sind und welche elektrische Leistung damit möglich ist.

Das symbolträchtige Projekt **SOLARIMPULSE** [20] von Bertrand Piccard und verschiedenen Partnern wurde im Berichtsjahr fortgesetzt. Das Ziel dieses Projekts ist die Weltumrundung mit einem photovoltaisch betriebenen Flugzeug.

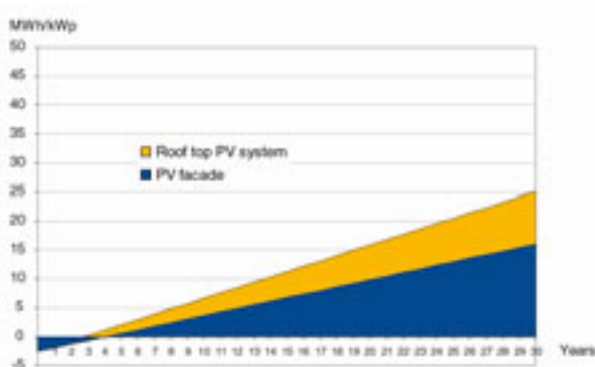
Ein weiteres Projekt dieser visionären Art ist das Projekt **PlanetSolar** [21], welches von einer Westschweizer Gruppe um den Initianten Raphaël Domjan entwickelt wird. PlanetSolar soll ein solarbetriebenes Boot werden, welches die Erde auf dem Wasser umrunden wird. Die Konzeptstudie (Fig. 5) sieht einen Trimaran von 30 m Länge und 16 m Breite vor, der Antrieb wird durch eine 180 m², rund 30 kWp grosse Solaranlage bewerkstelligt. Das Boot soll eine mittlere Reisegeschwindigkeit von 10 Knoten erreichen. Als Besatzung sind 2 Personen vorgesehen. Auch in diesem Projekt sind grosse technische Herausforderungen zu überwinden, insbesondere was die Statik des Bootes bei Wellengang anbetrifft.

INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT IEA, IEC, PVGAP

Die Beteiligung am Photovoltaikprogramm der IEA (*IEA PVPS*) wurde im Berichtsjahr mit Kontinuität fortgesetzt, sowohl auf der Projektebene wie im *Executive Committee (ExCo)* [46]. Die Schweiz hält weiterhin den Vorsitz dieses weltweiten Programms inne. Für die Beteiligung an ausgewählten Projekten im Rahmen des *IEA PVPS* Programms



Figur 5: Konzeptstudie des Solarbootes PlanetSolar (Bildquelle: PlanetSolar).



Figur 6: Energie-Rücklaufzeit: Gerechnete kumulierte Energieproduktion einer Photovoltaik Anlage in Bern (Bildquelle: IEA PVPS Task 10).

konnte der im Vorjahr 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 in Task 1 von IEA PVPS, welcher allgemeine **Informationsaktivitäten** [22] zur Aufgabe hat. Im Berichtsjahr wurde ein weiterer nationaler Bericht über die Photovoltaik in der Schweiz bis 2005 [47] ausgearbeitet; auf dieser Grundlage wurde die 11. Ausgabe des jährlichen internationalen Berichtes (*Trends Report*) über die Marktentwicklung der Photovoltaik in den IEA-Ländern erstellt [48]. Dieser Bericht wurde erneut für aktuelle Analysen der Photovoltaik durch den Finanzsektor verwendet [49,50]. Im Berichtsjahr wurden mehrere Workshops organisiert: An der 21. Europäischen Photovoltaik-Konferenz in Dresden fand ein Workshop über den *Trends Report* statt, in welchem wichtige Zielgruppen über die Datenbeschaffung und Interpretation informiert wurden. Ein weiterer

Workshop richtete sich an den Finanzsektor [51]; er wurde durch die Schweiz und Japan organisiert und fand im November 2006 in Zürich statt. Der *IEA PVPS-Newsletter* [52] informiert regelmässig über die Arbeiten in und rund um das IEA PVPS Programm.

In IEA PVPS Task 2 über **Betriebserfahrungen** [23] stellt TNC den Schweizer Beitrag. Die PVPS-Datenbank **Performance Database** wurde mit neuen Daten ergänzt und umfasst nun 460 Photovoltaik-Anlagen aus 22 Ländern mit insgesamt rund 1600 Betriebsjahren und 13.4 MWp Anlagenleistung. Die Datenbank ist neu auch online verfügbar [53]. Aus der Schweiz sind 66 Anlagen mit einer totalen Leistung von 2.95 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. Dazu wurden die verfügbaren Projekt- und Betriebsdaten für einen **Global Survey** erhoben. Diese Datenerfassung wurde im November 2006 abgeschlossen; sie enthält Daten von 680 Anlagen aus 19 Ländern.

Im Rahmen der interdepartementalen Plattform (SECO, DEZA, BAFU, BFE) zur Förderung der erneuerbaren Energien in der internationalen Zusammenarbeit **REPIC** [44] leistet *entec* den Schweizer Beitrag zu IEA PVPS Task 9 über die **Photovoltaik-Entwicklungszusammenarbeit** [24a]. 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 Canada und Japan abgehalten. Beobachtungen zeigen, dass die weltweit massiv gestiegene Förderung erneuerbarer Energien der Option Photovoltaik in der ländlichen Elektrifizierung nicht unbedingt zu Gute kommt, da die wirtschaftliche Ertragslage schwierig bleibt. Das Projekt befasst sich deshalb besonders mit dieser sich abzeichnenden Marginalisierung der Photovoltaik.

Planair vertritt die Schweiz neu im IEA PVPS Task 10 zur **Photovoltaik im urbanen Raum** [25]. Aus Schweizer Sicht stehen städtebauliche Fragen und solche des elektrischen Netzes im Vordergrund. Durch den Einbezug der Stadt Neuenburg in den Schweizer Beitrag sollen die anstehenden Fragen konkret aus dieser Perspektive angegangen werden. Task 10 hat im Berichtsjahr im Weiteren eine Informationsbroschüre zu wesentlichen Umweltparametern der Photovoltaik publiziert [54]; die Umweltparameter Energierücklaufzeit und die mögliche CO₂-Minderung wurden für Städte in OECD Ländern einzeln gerechnet (Fig. 6).

Meteotest [26] und das CUEPE an der Universität Genf [18b] erbringen zusammen den Schweizer Beitrag zum Task 36 **Solar Resource Know-**

ledge Management des IEA SHC Programms. Dieses Projekt sieht vor, die verschiedenen Methoden und Datengrundlagen von Solardaten global aufzuarbeiten und verfügbar zu machen. Task 36 ist organisatorisch Bestandteil des IEA SHC Programms, inhaltlich ist es jedoch für alle Solartechnologien relevant; dementsprechend erfolgt eine Zusammenarbeit mit den weiteren IEA Programmen zur Solarenergie (IEA PVPS und IEA PACES). Im Projekt wird die Qualität verschiedener Strahlungsmodelle und daraus abgeleiteter Produkte verglichen und optimiert.

Alpha Real vertritt im Namen des Fachverbandes SWISSOLAR die Schweiz im TC 82 der IEC und leitet die Arbeitsgruppe, welche internationale **Normenvorschläge** [27] für Photovoltaiksysteme vorbereitet und verabschiedet. Im Berichtsjahr befassten sich die Arbeiten insbesondere mit neuen Dokumenten zur verwendeten Terminologie, den minimalen Anforderungen für die Systemdokumentation, den Sicherheitsbestimmungen für Anlagen auf Gebäuden sowie der Bestimmung der Anlagenperformanz. Ein wichtiges Thema sind weiter Sicherheitsbestimmungen für Wechselrichter, für welche auch Schweizer Hersteller in die Arbeit mit einbezogen wurden. Elektrische Kontakte in Photovoltaiksystemen (z.B. Lötstellen oder Steckverbindungen), erhielten durch die bei Modulen von *BP-Solar* aufgetretenen Probleme in den Anschlussdosen im Berichtsjahr eine hohe Aktualität.

Alpha Real beteiligt sich ausserdem an **PVGAP** (PV Global Approval Program), einem weltweiten Programm zur Qualitätssicherung und Zertifizierung von Photovoltaik-Systemen. Es ist vorgesehen, PVGAP in die IECEE [55] überzuführen.

Die Beteiligung am EU-Projekt **PV-ERA-NET** [24b], welches Programmkoordinationsstellen und verantwortliche Ministerien aus 13 Ländern unter dem ERA-NET Schema [56] 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, die konkreten Forschungsthemen und Modelle der Zusammenarbeit zwischen verschiedenen nationalen Programme ausgearbeitet. Ein bedeutendes Thema bildete zudem die in der Europäischen Photovoltaik Technologie Plattform erarbeitete *Strategic Research Agenda* (SRA) [57], welche als wichtiges europäisches Referenzdokument betrachtet wird. Von Bedeutung ist dieses Dokument einerseits aufgrund seiner umfassenden Beschreibung der kurz-, mittel- und langfristigen Forschungsthemen in der Photovoltaik, der zeitlichen Entwicklung von Technologie und Wirtschaftlichkeit sowie in Bezug auf die Beziehungen zwischen privater und öffentlicher (nationaler und EU) Forschung.

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 und das Interesse an der Photovoltaik hält auch bei einem gedämpften Schweizer Markt an.

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.

Internationale Zusammenarbeit

Die traditionsreiche internationale Zusammenarbeit wurde auch im Berichtsjahr fortgesetzt: Die institutionelle Zusammenarbeit innerhalb der IEA, der IEC, PVGAP und den Europäischen Netzwerkprojekten wurde bereits beschrieben. Auf der Projektebene konnte die erfolgreiche Zusammenarbeit innerhalb der EU in bestehenden und neuen Projekten fortgesetzt werden. Im Jahr 2006 waren es 10 Projekte im 5. bzw. 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 Programmverantwortlichen in EU-Ländern statt, ebenso mit den zuständigen Einheiten bei der Europäischen Kommission.

Die Schweiz ist in der **Europäischen Photovoltaik Technologie Plattform** [57] sowohl im Steuerungsausschuss wie in einzelnen Arbeitsgruppen vertreten. Technologie Plattformen sind ein neues Instrument, welches für ausgewählte Technologien eine breitere Trägerschaft und eine gemeinsa-

me Strategie der beteiligten Akteure ermöglichen soll, indem typischerweise Forschungskreise, 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 einerseits die starke Einbindung der Industrie, welche im Rahmen der Technologie-Plattformen eine tragende Rolle spielt. Im Berichtsjahr

wurde die *Strategic Research Agenda* (SRA) weitgehend fertiggestellt.

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.

Pilot- und Demonstrationsprojekte (P+D)

Erstmals seit 2003 konnten im Berichtsjahr zwei neue P+D Projekte begonnen werden. Das eine befasst sich thematisch mit der **optimalen Integration einer Photovoltaik Anlage ins Energiekonzept eines Nullenergieschulhauses** in Kreuzlingen, das andere mit der **Integration von Photovoltaik Dünnschichtelementen ins Dach einer Turnhalle**. Trotz dieser beiden neuen Projekte ist das P+D Programm inzwischen auf wenige Projekte geschrumpft, die sich fast alle 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 in Kombination mit dem seit Jahren stagnierenden einheimischen Markt zunehmend schwerer, neue und innovative Produkte für den Photovoltaik Anwendungsbereich auf den Markt zu bringen. Internationale Konferenzen zeigen deutlich, dass sich Schweizer Firmen im Bereich der Produktionsausrüstung und teilweise im Wechselrichterbereich gut halten und steigende Umsätze erzielen. Im Bereich der Produktinnovation bei der Umsetzung im Anlagensektor kommen die Neuerungen aber meist aus Deutschland, Japan oder den USA. Immerhin haben einige erfolgreiche Schweizer Projekte der letzten Jahre immer noch eine Wirkung im deutschen Raum.

Der weltweite Photovoltaikmarkt boomt aufgrund grossangelegter Förderprogramme bzw. Einspeisevergütungen in immer mehr Ländern weiterhin mit jährlichen Wachstumsraten von rund 35 %. 2006 erreichte die weltweite Modulproduktion gegen 2300 MWp. Damit sind zur Zeit grundsätzlich gute Exportmöglichkeiten für innovative Produkte vorhanden, die von einigen Schweizer Firmen auch erfolgreich wahrgenommen werden.

Die noch verbleibenden Photovoltaik P+D Projekte behandelten schwerpunktmässig weiterhin die Thematik der **Photovoltaik Gebäudeintegration**.

NEUE P+D PROJEKTE

- Dachanlage Turnhalle Wiesendangen mit amorphen Dünnschichtmodulen (Einsatz von BIOSOL XXL Dachelementen, bestehend aus UNI-Solar Dünnschichtmodulen kombiniert mit Solrif Rahmen; Leitung: *Enecolo*) [28a];
- Photovoltaikanlage Nullenergieschulhaus Ekharthof Kreuzlingen (Einbindung einer PV Anlagen ins Energiekonzept eines Nullenergieschulhauses; Leitung: *Böhni Energie und Umwelt*) [29].

LAUFENDE P+D PROJEKTE

Bei dem laufenden Projekten belegt das Projekt **PV Fassadensystem für Module mit Dünnschichtzellen** die optischen Qualitäten dieses Fassadentyps. Die Fläche erscheint optisch als eine Einheit, wie man sich das von dunklen Glasfassaden gewohnt ist [30].

Die laufenden Projekte umfassen (in chronologischer Reihenfolge):

Komponentenentwicklung

- **Neues PV Fassadensystem für Module mit Dünnschichtzellen** (Entwicklung eines universellen Fassadensystems wahlweise mit oder ohne thermischer Isolation für Dünnschichtmodule; Leitung: *Zagsolar / Wyss Aluhit*) [30] (Fig. 7).

Anlagen

- **17.6 kWp Flachdachanlage mit Dünnschichtmodulen ETHZ** (Optisch diskrete Flachdachanlage mit amorphen Zellen; Leitung: *BE Netz*) [31] (Fig. 8);
- **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*) [32];
- **12 kWp Solight Pilotanlage** (Pilotmässige Umsetzung von zwei verschiedenen *Solight* Varianten; Leitung: *Energiebüro*) [33].

Messkampagnen

- **Messkampagne Wittigkofen** (Detaillierte Messungen und Auswertungen mit Visualisierung der Daten zur 80 kWp Fassade Wittigkofen; Leitung: *Ingenieurbüro Hostettler*) [34a].



Figur 7: Fassadenintegration mit Dünnschichtmodulen (Bildquelle: Zagsolar).



Figur 8: Teil der Flachdachanlage ETHZ (Bildquelle: Energiebüro).

Studien - Hilfsmittel - diverse Projekte

- **Photovoltaikstatistik der Schweiz 2005** (Leitung: *Ingenieurbüro Hostettler*) [34b].

IM JAHR 2006 ABGESCHLOSSENE PROJEKTE

Im Jahr 2006 wurden die folgenden P+D Projekte abgeschlossen (in chronologischer Reihenfolge):

Anlagen

- **15.4 kWp Flachdachintegration CPT Solar** (Pilotmässiger Einsatz einer neu entwickelten Kombination von amorphen Dünnschichtmodulen mit einer dichten Kunststoffolie; Leitung: *ISAAC*) [35];
- **25 kWp Gründachintegration Solgreen Kraftwerk 1, Zürich** (Piloteinsatz einer neu entwickelten Modulhalterkonstruktion für den Gründachbereich; Leitung: *Enecolo*) [28b];
- **Autonome 5.7 kWp Photovoltaik Anlage in Kombination mit einem BHKW** (Ganzjährige autonome Energieversorgung von 2 Chalets mittels Photovoltaik, BHKW, thermischen Kollektoren und Holz; Leitung: *A. Reinhard*) [36].

Studien - Hilfsmittel - diverse Projekte

- **Solar Electri City Guide - Schweizer Solarstromführer für die Gemeinden** (Leitung: *NET*) [37].

Die Publikation **Solarstrom in der Gemeinde**, welche aus einem früheren EU-Projekt **PV-City Guide** hervorgeht, besteht aus einer umfassenden und illustrationsreichen Broschüre und aus weiteren sieben (elektronisch verfügbaren) Dokumenten zur vertieften Behandlung thematischer Schwerpunkte [58]. Damit ermöglicht die Publikation eine neue, bisher nicht vorhandene Gesamtschau der Photovoltaik auf Gemeindeebene in der Schweiz und sie bietet zahlreiche Handlungsbeispiele.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Global war das Jahr 2006 für die Photovoltaik ein weiteres erfolgreiches Jahr. In einer durch hohes Wachstum gezeichneten Marktdynamik konnte die Photovoltaik Industrie ihren Ausbau fortsetzen. Durch das rasche Wachstum hat sich aber der Engpass in der Verfügbarkeit von Rohsilizium weiter verschärft. Es finden weltweit Investitionen in neue Produktionskapazitäten von Solarsilizium statt, welche die angespannte Situation ab ca. 2008 entschärfen sollten. Bereits Ende 2006 zeichnete sich eine Trendumkehr zu niedrigeren Systempreisen ab. Parallel dazu besteht für Dünnschicht Solarzellen aufgrund dieser angespannten Situation ein interessantes *window of opportunity* – sprich Chancen für diese Tech-

nologien. Als konkretes Beispiel dieser jüngsten Entwicklung konnte die *oerlikon* im Berichtsjahr grosse Bestellungen für Depositionsanlagen von Dünnschicht Solarzellen aus amorphem Silizium entgegennehmen.

Durch die im Jahr 2006 im Parlament erfolgten politischen Diskussionen rund um das Stromversorgungsgesetz und der darin vorgesehenen Förderung der erneuerbaren Energien erhielt die Photovoltaik auch in der Schweiz grosse Aufmerksamkeit. Mit den inzwischen verabschiedeten Beschlüssen besteht nach vielen Jahren Aussicht auf eine Verbesserung des Photovoltaikmarktes, in dem ab 2008 eine kostendeckende Vergütung

vorgesehen ist. 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 2006 auf mindestens 350 Mio. CHF geschätzt. Zusammen mit dem Heimmarkt kann der Gesamtumsatz der Schweizer Photovoltaik mit ca. 400 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. 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 wachsenden internationalen 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 wird im Jahr 2007 die Grundlage bilden für die Ausarbeitung des entsprechenden Photovoltaik Forschungskonzeptes. 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 findet in Luzern die **7. Nationale Photovoltaik Tagung** statt. Sie wird sich insbesondere den neuen Schweizer Rahmenbedingungen für die Photovoltaik widmen. 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 **21. europäischen Photovoltaik Konferenz** im September in Dresden mit ihren Beiträgen gut vertreten [59].

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

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) • b) *High rate deposition of $\mu\text{-Si:H}$ silicon thin-film solar cell devices in industrial KAI PECVD reactor* (JB) • c) *Stability of advanced LP-CVD ZnO within encapsulated thin film silicon solar cells* (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] Ch. Hollenstein, (christophe.hollenstein@epfl.ch), CRPP / EPFL, Lausanne: *A new large area VHF reactor for high rate deposition of micro-crystalline silicon for solar cells* (JB) http://crppwww.epfl.ch/crpp_proc.htm.
- [3] F. Baumgartner, (Franz.Baumgartner@ntb.ch), NTB, Buchs.: *Spectral photocurrent measurement system of thin film silicon solar cells and modules* (JB) <http://www.ntb.ch/pv>.
- [4] K. Wasmer, (kilian.wasmer@empa.ch), Empa, Thun, *SIWIS: Ultra Thin Silicon Wafer Cutting by Multi-Wire Sawing* (JB) <http://www.empathun.ch>.

- [5] S. Schneeberger, (sschneeberger@hct.ch), HCT SHAPING SYSTEMS, Cheseaux: **BITHINK: Bifacial thin industrial multi-crystalline silicon solar cells** (JB) <http://www.hct.ch>.
- [6] A.N. Tiwari, (tiwari@phys.ethz.ch), ETH, Zürich: a) **FLEXCIM: Flexible CIGS solar cells and mini-modules** (JB, SB) • b) **LARCIS: Large-Area CIS Based Thin-Film Solar Modules for Highly Productive Manufacturing** (JB) • c) **ATHLET: Advanced Thin-Film Technologies for Cost Effective Photovoltaics** (JB) <http://www.hmi.de/projects/athlet/> / <http://www.tfp.ethz.ch>.
- [7] M. Grätzel, (michael.gratzel@epfl.ch), EPFL, Lausanne: a) **Dye-sensitised Nanocrystalline Solar Cells** (JB) • b) **Voltage Enhancement of Dye Solar Cells at Elevated Operating Temperatures** (JB) • c) **MOLYCELL - Molecular Orientation, Low bandgap and new hybrid device concepts for the improvement of flexible organic solar CELLS** (JB) <http://isic.epfl.ch/>.
- [8] A. Meyer, (andreas@solaronix.com), SOLARONIX, Aubonne: **A new PV wave making more efficient use of the solar spectrum – FULLSPECTRUM** (JB) <http://www.fullspectrum-eu.org/> / <http://www.solaronix.com>.
- [9] J.A.E. Manson, (jan-anders.manson@epfl.ch), EPFL / LTC, Lausanne: **Photovoltaic Textile - Photovoltaic Fibers and Textiles based on Nanotechnology** (JB) <http://ltc.epfl.ch/>.
- [10] F. Nüesch, (frank.nuesch@empa.ch), EMPA, Dübendorf: a) **Organic photovoltaic devices** (JB) • b) **ThinPV** http://www.empa.ch/plugin/template/empa/901/*/--/l=1.
- [11] G. Calzaferri, (gion.calzaferri@iac.unibe.ch), UNI, Bern: **Photoelektrochemische und Photovoltaische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie** (JB) <http://www.dcb.unibe.ch/groups/calzaferri/>.
- [12] T. Szacsavay, (Tamas.Szacsavay@3-s.ch), 3S, Lyss: a) **Photovoltaics Modules with Antireflex Glass** (JB, SB) • b) **BIPV-CIS- Improved integration of PV into existing buildings by using thin film modules for retrofit** (JB) <http://www.3-s.ch>.
- [13] A. Bernasconi, (angelo.bernasconi@supsi.ch), SUPSI, DACD, ISAAC-TISO, Canobbio: a) **Centrale LEE-ISO Periode VII : 2003-2006** (JB) • b) **PV Enlargement** (JB) • c) **PERFORMANCE - ISAAC Activities** (JB) <http://www.pv-performance.org/> / www.isaac.supsi.ch.
- [14] W. Durisch, (wilhelm.durisch@psi.ch), PSI, Villigen: a) **Efficiency and Annual Electricity Production of PV-Modules** (JB) • b) **A new PV wave making more efficient use of the solar spectrum – FULLSPECTRUM** <http://www.fullspectrum-eu.org/> / <http://www.psi.ch/>
- [15] H. Häberlin, (heinrich.haeberlin@bfh.ch), HTI, Burgdorf: **Photovoltaik Systemtechnik 2005-2006 (PVSYSTE 05-06)** (JB, SB) <http://www.pvtest.ch>.
- [16] P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), ENECOLO, Mönchaltorf: a) **Solar Inverter mit integriertem BackUp SIMIBU** • b) **ENVI-SOLAR - Environmental Information Services for Solar Energy Industries** (JB) <http://www.envisolar.com/> / <http://www.solarstrom.ch>.
- [17] N. Jungbluth, (jungbluth@esu-services.ch), ESU-services, Uster: **Update Photovoltaic in view of ecoinvent data v2.0** (JB) www.esu-services.ch.
- [18] A. Mermoud, (andre.mermoud@cuepe.unige.ch), CUEPE, Genève: .a) **Technico-economical Optimization of Photovoltaic Pumping Systems** (SB) • b) P. Ineichen, (pierre.ineichen@cuepe.unige.ch), CUEPE, Genève: **Solar Resource Management, IEA Solar Heating & Cooling Programme, Task 36** <http://www.unige.ch/cuepe>.
- [19] Ch. Roecker, (christian.roecker@epfl.ch) EPFL - LESO, Lausanne: **Evaluation du potentiel de concentrateurs à Quantum Dots pour la production d'électricité photovoltaïque**, <http://leso.epfl.ch/>.
- [20] A. Borschberg, (andre.borschberg@solarimpulse.com) SOLAR IMPULSE, Lausanne: **Solarimpulse** <http://www.solar-impulse.com>.
- [21] R. Domjan, (info@planetsolar.org) PLANETSOLAR, Neuchâtel: **PlanetSolar** <http://www.planetsolar.org/>.
- [22] P. Hüsler, (pius.huesser@novaenergie.ch), NOVA ENERGIE, Aarau: **Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Programm - Task 1** (JB) www.iea-pvps.org/ / <http://www.novaenergie.ch/>.
- [23] Th. Nordmann, (nordmann@tnc.ch), TNC CONSULTING, Erlenbach: **IEA PVPS Programm Task 2 Schweizer Beitrag 2006** (JB) <http://www.tnc.ch>.
- [24] 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>.
- [25] P. Renaud, (pierre.renaud@planair.ch), Planair, La Sagne: **IEA PVPS Task 10 – Swiss contribution** (JB) <http://www.planair.ch>.
- [26] J. Remund, (remund@meteotest.ch), METEOTEST, Bern: **IEA SHC Task 36: Solar resource knowledge management** (JB) <http://www.meteotest.ch>.
- [27] M. Real, (alphareal@access.ch), SWISSOLAR, Zürich: **Normenarbeit für PV Systeme** (JB) <http://www.swissolar.ch>.

Liste der P+D – Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

Einzelne Jahresberichte und Schlussberichte können von <http://www.photovoltaic.ch> heruntergeladen werden. Unter den aufgeführten Internet-Adressen sind weitergehende Informationen vorhanden.

- [28] P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), ENECOLO, Mönchaltorf: a) **Dachintegration mit amorphen Dünnschichtzellen Turnhalle Wiesendangen** (JB) • b) **Solgreen Kraftwerk 1 Zürich** (JB, SB) / <http://www.solarstrom.ch>.
- [29] Th. Böhni, (boehni@euu.ch), BÖHNI ENERGIE UND UMWELT, Frauenfeld: **Nullenergieschulhaus Heilpädagogisches Zentrum Ekkharthof Kreuzlingen** (JB) / <http://www.euu.ch>.
- [30] R. Durot, (r.durot@zagsolar.ch), ZAGSOLAR, Kriens: **Photovoltaic- Façade, Mounting System for Thin-Film-Modules** (JB) / <http://www.zagsolar.ch>.
- [31] 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) / <http://www.benetz.ch>.
- [32] U. Muntwyler, (muntwyler@solarcenter.ch), MUNTWYLER ENERGIETECHNIK, Zollikofen: **Autonome Stromversorgung mit Photovoltaik und Brennstoffzellen** (JB) / <http://www.solarcenter.ch>.
- [33] Ch. Meier, (info@energieburo.ch), ENERGIEBÜRO, Zürich: **Preparation and Realisation of the Test- and Pilot Installation SOLIGHT** / <http://www.energieburo.ch>.
- [34] Th. Hostettler (Hostettler_Engineering@Compuserve.com), INGENIEURBÜRO HOSTETTLER, Bern: a) **Messkampagne Wittigkofen** (JB) • b) **Photovoltaic Energy Statistics of Switzerland 2005** (JB)
- [35] D. Chianese, (domenico.chianese@supsi.ch), SUPSI, DACD, ISAAC-TISO, Canobbio: **Flat roof integration CPT Solar** (JB) / <http://www.isaac.supsi.ch>.
- [36] A. Reinhard, **Autonome 5.7 kWp Photovoltaik Anlage in Kombination mit einem BHKW**
- [37] S. Nowak, (stefan.nowak@netenergy.ch), NET, St. Ursen: **Swiss Solar ElectriCity Guide - Publikation «Solarstrom in der Gemeinde»** (JB, SB) / <http://www.netenergy.ch>.

Referenzen

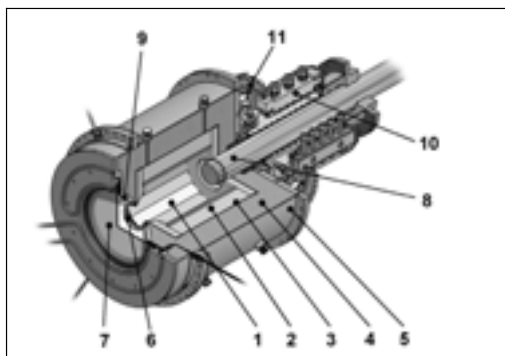
- [38] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 bis 2007**, Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, 2004, <http://www.energieforschung.ch>.
- [39] **Forschungskonzept Photovoltaik 2004 – 2007**, Bundesamt für Energie, 2005, <http://www.photovoltaic.ch>.
- [40] <http://www.flisom.ch>.
- [41] www.dyesol.com.
- [42] <http://www.ecoinvent.org>.
- [43] <http://www.spyce.ch>.
- [44] <http://www.repic.ch>.
- [45] <http://www.pvsyst.com>.
- [46] **Annual Report 2006**, IEA PVPS, 2007, <http://www.iea-pvps.org/>.
- [47] **National Survey Report on PV Power Applications in Switzerland 2005**, P. Hüsler, (pilus.huessler@novaenergie.ch), Nova Energie, Mai 2006.
- [48] **Trends in Photovoltaic Applications in selected IEA countries between 1992 and 2005**, IEA PVPS Task 1 – 15: 2006, <http://www.iea-pvps.org>.
- [49] **Nachhaltigkeitsstudie – Solarenergie 2006**, M. Fawer-Wasser, Sarasin, Dezember 2006
- [50] **Photovoltaik Marktmodell – Das «Vollgas-Zeitalter» beginnt**, Landesbank Baden-Württemberg, Februar 2007.
- [51] **International Workshop on Solar Photovoltaic Electricity: A Wealth of Investment Opportunities under the Sun, IEA PVPS Task 1**, <http://www.iea-pvps.org>.
- [52] **IEA PVPS Newsletter**, zu beziehen bei Nova Energie, Schachenallee 29, 5000 Aarau, Fax 062 834 03 23, (pilus.huessler@novaenergie.ch).
- [53] **Performance Database**, IEA PVPS Task 2, September 2006, download: <http://www.task2.org>.
- [54] **Environmental benefits of PV systems in OECD cities**, IEA PVPS Task 10, September 2006, <http://www.iea-pvps.org>.
- [55] **Worldwide System for Conformity Testing and Certification of Electrical Equipment and Components (IECEE)** <http://www.iecee.org>.
- [56] http://ec.europa.eu/research/fp6/index_en.cfm?p=9_eranet.
- [57] <http://www.eupvplatform.org>.
- [58] **Publikationen Solarstrom in der Gemeinde**, zu beziehen bei NET, Waldweg 8, 1717 St. Ursen, info@netenergy.ch, <http://www.photovoltaic.ch>.
- [59] **Die 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference & Exhibition Dresden 04. - 08.09.2006 aus Schweizer Sicht**, zu beziehen bei der Programmleitung Photovoltaik, c/o NET, Waldweg 8, 1717 St. Ursen, info@netenergy.ch, <http://www.photovoltaic.ch>.

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

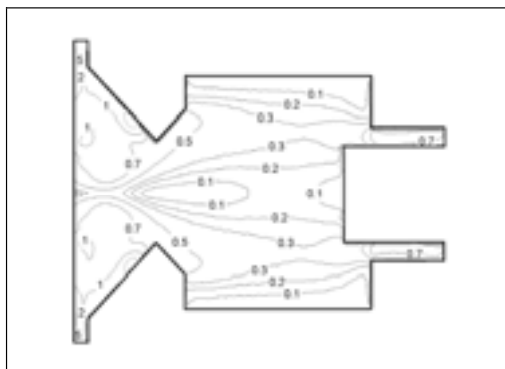
PROGRAMM INDUSTRIELLE SOLARENERGIENUTZUNG

Pierre Renaud

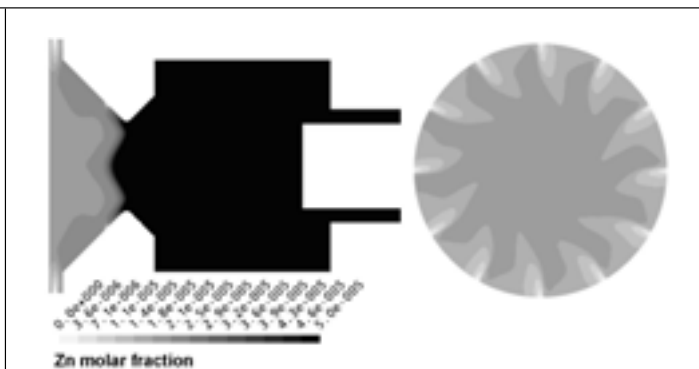
pierre.renaud@planair.ch



Schematic of the solar chemical reactor configuration: 1 = rotating cavity lined with sintered ZnO tiles, 2 = 80%Al₂O₃-20%SiO₂ insulation, 3 = 95%Al₂O₃-5%Y₂O₃ CMC, 4 = alumina fibres, 5 = Al reactor shell, 6 = aperture, 7 = quartz window, 8 = dynamic feeder, 9 = front cone, 10 = rotary joint, 11 = chain wheel.



A)



B)

Technologie de réacteur solaire et modélisation de réacteur

Panneau du haut : schéma de configuration d'un réacteur solaire chimique [10]. *Panneau du bas* : résultats de l'exercice de modélisation [10]. A) Section transversale du champ de vitesse au centre du réacteur (vitesse en m/s); B) Fraction molaire de Zn(g) à l'intérieur du réacteur (illustration de gauche) et sur un plan situé à 4 mm de la vitre en quartz (illustration de droite).

Centres de gravité du programme et buts fixés

Le programme a subi diverses adaptations et modifications en 2006: clarification des secteurs «hydrogène» et «chimie solaire», élimination de projets ne concernant pas directement le programme et réflexions face à des secteurs pouvant intéresser directement le programme.

A la suite de cette première évaluation, le nom du programme a été adapté pour gagner en clarté (Utilisation industrielle de l'énergie solaire). Les buts fixés pour 2007 sont clairs: évaluer les dif-

férents domaines dans le cadre desquels le programme va se développer de façon à garantir une approche pragmatique tenant compte des intérêts de l'industrie suisse et du potentiel disponible.

A noter qu'actuellement, la majeure partie des projets est traitée directement par le *PSI* et l'*ETH* Zurich (principalement production d'hydrogène par thermo réaction et thermo oxydation selon le cycle ZnO/Zn).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

Solarchemie-Forschung am PSI und an der ETH Zürich

Das Labor für Solartechnik (LST) am *PSI* und die Professur für Erneuerbare Energieträger (PRE) an der *ETH* Zürich erforschen gemeinsam thermochemische Hochtemperatur-Prozesse, mit denen konzentrierte Sonnenenergie effizient in speicher- und transportierfähige chemische Brenn- und Treibstoffe wie Wasserstoff umgewandelt werden kann. Die in Figur 1 dargestellten fünf thermochemischen Hauptwege zur Herstellung von «solarem Wasserstoff» benutzen konzentrierte Solarstrahlung als Energiequelle für die Hochtemperatur-Prozesswärme. Für die solare Thermolyse und die geschlossenen solaren thermochemischen Kreisprozesse wird einzig Wasser (H_2O) verbraucht. Bei den hybriden solar-fossilen Prozessen wie beim solaren Kracken (von Erdöl), der solaren Dampfpreformierung (von Erdgas) und der solaren Dampfvergasung (von Kohle) dienen die fossilen Brennstoffe lediglich als chemische Ausgangsstoffe für den solaren Wasserstoff. Die karbothermische Zinkoxid-Reduktion schliesslich ist ein Hybridprozess, bei dem der Kohlenstoff als Reduktionsmittel zur Herstellung von Zink wirkt, aus dem dann durch Reaktion mit Wasser reiner Wasserstoff gewonnen wird.

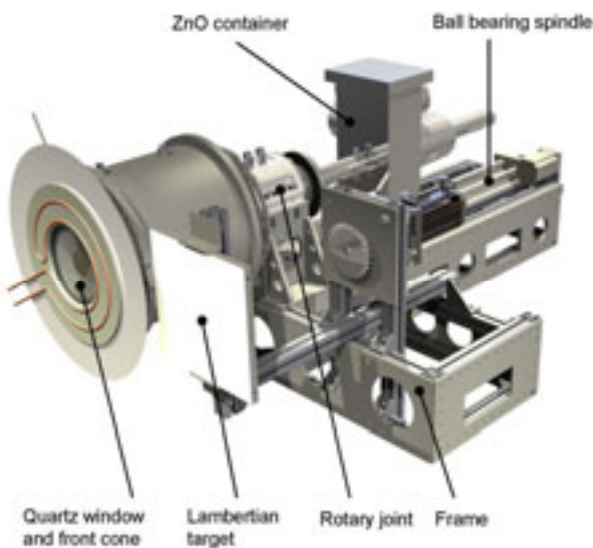


Figur 1: Fünf thermochemische Wege zur Herstellung von solarem Wasserstoff.

Solarthermische Spaltung von Wasser zur Wasserstoffproduktion

Mit konzentrierter Solarstrahlung betriebene thermochemische Kreisprozesse zur Spaltung von Wasser bieten das Potenzial für eine energieeffiziente Massenproduktion von Wasserstoff. Unter den im Blickpunkt des Interesses stehenden Metalloxidzyklen sticht insbesondere der Zinkoxid/Zink-Zyklus hervor, der einen hohen thermischen Energieumwandlungswirkungsgrad von über 40% und entsprechend hohe wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit verspricht. Dieser zweistufige Kreisprozess umfasst einerseits die endotherme solarthermische Dissoziation von Zinkoxid in Zink und Sauerstoff, und andererseits die nicht-solare exotherme Hydrolyse von Zink zu Wasserstoff und Zinkoxid, welches anschliessend wieder dem solaren Prozess zugeführt wird. Der erste Prozessschritt wird am *PSI* in einem Hochtemperatur-Solarreaktor bei Temperaturen über 2000 K untersucht. Der neuartige 10 kW Prototypreaktor *ZIRRUS* wurde weiter verbessert, indem der rotierende Hohlraumreaktor mit einer Mehrfachsicht aus keramischen Materialien ausgekleidet wurde, die sich im bisherigen Verlauf der Experimente im Hochfluss-Solarsimulator am *PSI* als thermisch stabil und korrosionsbeständig erwies (Fig. 2). Zudem konnte die Strömungsführung des Trägergases so gestaltet werden, dass das Quarzfenster weitgehend vor Ablagerungen durch kondensierende Gase geschützt wird (siehe Titelbild). Dies sind wichtige Voraussetzungen für einen problemlosen Langzeitbetrieb des Solarreaktors, wie er im Hinblick auf ein Scale-up im Projekt **Solar Thermal Production of Zinc – Final Steps Toward Scale-Up** [1] angestrebt wird. Im Projekt **Solarthermische Beiträge zur Reduktion des CO₂-Ausstosses** [2] werden die chemisch-physikalischen Bedingungen modelliert und gemessen, welche eine effiziente und technisch realisierbare Separation des Zinkdampfs von den restlichen Gasen am Ausgang des Solarreaktors erlauben. Zur Validierung eines komplexen Nukleationsmodells wird gegenwärtig eine Anlage auf den Betrieb

mit Zinkdampf bei Temperaturen bis etwa 1170 K umgerüstet. Zwei weitere experimentelle Aufbauten liefern Informationen zur Modellierung der Reoxidation von Zink und Sauerstoff und dienen der Entwicklung einer Laborapparatur zur Trennung dieser Gase. Diese Untersuchungen sind von entscheidender Bedeutung für eine effiziente und technisch funktionierende Bereitstellung von Zink. In einem *ETH*-Projekt **Zinc Hydrolysis for Hydrogen Production** [3] wurde der zweite Schritt des Zinkoxid/Zink-Kreisprozesses experimentell untersucht und dabei gezeigt, dass bei der Umsetzung von solar produziertem Zink mit Wasser zu Zinkoxid und Wasserstoff mit Ausbeuten bis zu 80% gerechnet werden darf. Eine Lebenszyklusanalyse (LCA) im Rahmen des *CCEM*-Projekts **Transition to Hydrogen Based Transportation** [4] kommt zum Schluss, dass der Zinkoxid/Zink-Zyklus zur Speicherung von Sonnenenergie in Wasserstoff für die Verwendung in Brennstoffzellenfahrzeugen eine viel versprechende Option für den Ersatz von fossilen Treibstoffen in zukünftigen Transportsystemen darstellt.

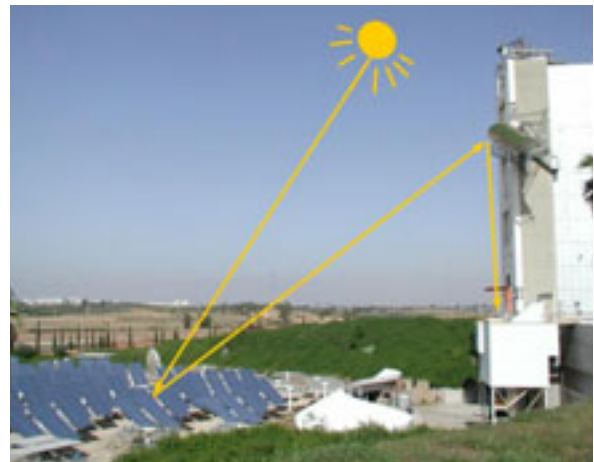


Figur 2: Experimenteller Aufbau des 10 kW Prototypreaktors im Hochfluss-Solarsimulator am PSI [10].

Solarthermische Herstellung von Wasserstoff und Synthesegas aus fossilen Rohstoffen

Fügt man zum Zinkoxid Kohle oder Erdgas als Reduktionsmittel hinzu, kann die Reaktionstemperatur dieser karbothermischen Prozesse im Vergleich zum oben beschriebenen Zinkoxid/Zink-Prozess drastisch gesenkt werden. Im Rahmen des EU-Projekts **SOLZINC** (2001-2005) [5] mit massgeblicher Schweizer Beteiligung wurde der ZnO/C-Prozess in einer Pilotanlage mit 300 kW solarer Leistung getestet (Fig. 3). Die solare Reaktortechnologie war eine Schweizer Entwicklung des *PSI* und der *ETH* Zürich und bildete das

Herzstück der Anlage. Die konzentrierte Sonnenenergie heizte den Reaktor auf etwa 1500 K auf. Etwa 50 kg Zinkstaub wurden stündlich produziert. Der thermische Wirkungsgrad dieser Anlage lag bei 30%, der bei grösseren industriellen Anlagen auf 50 bis 60% gesteigert werden kann. Der produzierte Zinkstaub eignet sich sowohl für die Stromproduktion in Zink-Luft-Batterien als auch für die Wasserstoffherstellung. Bestrebungen sind im Gang, diesen viel versprechenden Prozess zusammen mit Industriepartnern in einer 5 MW Solaranlage zu demonstrieren.

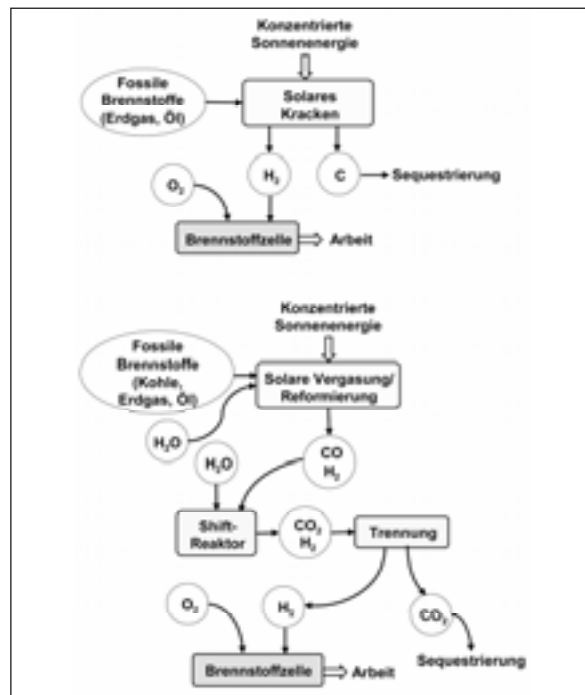


Figur 3: Experimenteller Aufbau des 300 kW Pilotreaktors (oben) in der «Beam-Down»-Solaranlage am Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel (unten).

Mittelfristig ist es durchaus sinnvoll, solare Hybridprozesse zu entwickeln, die zwar fossile Brennstoffe als chemische Ausgangsstoffe zur Herstellung von Wasserstoff verwenden, jedoch die benötigte Prozesswärme ausschliesslich aus konzentrierter Sonnenenergie beziehen (Fig. 4). Solche Verfahren sind somit sauberer und effizienter als die Verbrennung der ursprünglichen fossilen Brennstoffe. Grundlegende thermodynamische und kinetische Untersuchungen zum solarthermischen Cracken von Ergas (Methan, CH_4) zur Herstellung von Wasserstoff und hochwertigem Kohlenstoff

(«carbon black») wurden am *PSI* und an der *ETH* Zürich in einem 5 kW Solarreaktor durchgeführt; gegenwärtig wird der Prozess im Rahmen des EU-Projekt **SOLHYCARB** (2006-2010) [6] aufskaliert. Beim EU-Projekt **SOLREF** (2005-2009) [7] soll die solare Dampfpreformierung von Methan in einer 400 kW Pilotanlage demonstriert werden, wobei die *ETH* Zürich für die Prozessmodellierung zuständig ist. In einem von der *ETH* Zürich initiierten Industrieprojekt **SynPet** (2002-2007) [8] wird durch solare Dampfvergasung von «Petcoke» («petroleum coke» – ein Nebenprodukt der Erdölindustrie) 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. Nach erfolgreichen Tests mit einem 5 kW Prototypreaktor am *PSI* ist für 2007 geplant, den Prozess in einer 500 kW Pilotanlage im europäischen Testzentrum *Plataforma Solar de Almería* (PSA) in Südspanien zu demonstrieren.

Mit solchen solaren Hybridprozessen lässt sich der Ausstoss von Treibhausgasen und anderen Schadstoffen um denjenigen Anteil vermindern, der bei der Wärme- und Stromproduktion durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen entsteht. Solare Brenn- und Treibstoffe ermöglichen eine umweltfreundliche Energieversorgung und leisten damit einen Beitrag zur Lösung der Klimaproblematik.



Figur 4: Schema von zwei solaren Hybridprozessen für die Dekarbonisierung von fossilen Brennstoffen zur Herstellung von Wasserstoff und Strom. Fossile Brennstoffe dienen als Rohmaterial und die konzentrierte Sonnenenergie als Quelle für die Hochtemperatur-Prozesswärme. Die Vorteile dieser Prozessführung sind dreifach: 1) CO₂-Emissionen werden vermieden; 2) die gasförmigen Produkte werden nicht durch Verbrennungsnebenprodukte kontaminiert; 3) der Heizwert des fossilen Brennstoffs wird erhöht [11].

Nationale Zusammenarbeit

Das Labor für Solartechnik (*LST*) am *PSI* und die Professur für Erneuerbare Energieträger (*PRE*) an der *ETH* Zürich erforschen gemeinsam solarchemischen Hochtemperaturprozesse. Die beiden Labors sind aktiv im Rahmen des neu gegründe-

ten **Competence Center Energy and Mobility (CCEM-CH)** und von **Hydropole – Swiss Hydrogen Association**. Mit folgenden Forschungslabors besteht eine enge Zusammenarbeit:

Zn Hydrolyse	<i>ETH</i> Zürich – Particle Technology Laboratory (Prof. S. Pratsinis), Zürich
Hochtemperatur-Materialien	<i>EMPA</i> – High Performance Ceramics Laboratory (Dr. U. Vogt), Dübendorf

Internationale Zusammenarbeit

Die Forschung auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Solarchemie ist international eingebettet in das **SolarPACES Implementing Agreement** [5] der *IEA – International Energy Agency* (Operating Agent Task II – Solar Chemistry Research: Dr. A. Meier), in *IPHE – International Partnership for the Hydrogen Economy* (Projekt **Solar Driven High**

Temperature Thermochemical Production of Hydrogen) [12], und *SOLLAB – Alliance of European Laboratories on solar thermal concentrating systems* (Zusammenschluss von fünf führenden europäischen Forschungslabors) [13]. Aktuell wird mit folgenden Forschungsinstitutionen zusammengearbeitet:

Australien	<i>ANU</i> – Australian National University, Canberra <i>CSIRO</i> – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Newcastle, NSW
Deutschland	<i>DLR</i> – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln und Stuttgart
Frankreich	<i>CNRS</i> – Centre National de la Recherche Scientifique, Odeillo
Israel	<i>WIS</i> – Weizmann Institute of Science, Rehovot
Japan	<i>TIT</i> – Tokyo Institute of Technology, Tokyo
Spanien	<i>CIEMAT</i> – Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Madrid und Plataforma Solar de Almería (<i>PSA</i>)
USA	<i>NREL</i> – National Renewable Energy Laboratories, Golden, CO <i>SNL</i> – Sandia National Laboratory, Albuquerque, NM <i>UC</i> – University of Colorado, Denver, CO

Evaluation de l'année 2006 et perspectives pour 2007

L'année 2006 a été clairement marquée par la restructuration du programme et une redéfinition de ses lignes directrices. Les premières pistes ont été données.

2007 se doit de définir les objectifs à moyen et long terme. Les points suivants seront prioritaires:

- Réflexions concernant la suite des recherches actuellement en cours dans le domaine de la thermochimie solaire (notamment le cycle ZnO / Zn, la mise au point du réacteur de thermodynamique et la réduction carbo-thermique du ZnO).
- Dans le domaine de la chaleur à haute température, évaluation et définition du poids à donner au développement des matériaux dans le domaine du solaire à haute température (températures proches de 2'300 K).

- Une enquête sur les besoins de l'industrie doit donner les réponses aux questions suivantes :
La production d'électricité par installations héliothermiques est-elle porteuse en Suisse ?
Les intérêts suisses dans ces technologies sont-ils suffisants pour soutenir ce secteur ?
- D'autres domaines peuvent-ils être intégrés au programme (notamment production thermo-chimique de combustible, recyclage de déchets dangereux, ...) ?

Les objectifs devront alors être précisés au moyen de feuilles de routes répondant à des objectifs qualitatifs et quantitatifs selon les principes énoncés dans le *Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération 2008 – 2011* élaboré par la CORE.

Liste der F+E – Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden

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

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

- [1] A. Meier (anton.meier@psi.ch), A. Steinfeld, PSI Villigen: **Solar Thermal Production of Zinc – Final Steps Toward Scale-up** (JB).
- [2] I. Alxneit, H.R. Tschudi, C. Wieckert (christian.wieckert@psi.ch) PSI Villigen: **Solarchemische Beiträge zur Reduktion des CO₂-Ausstosses** (JB).
- [3] A. Steinfeld (aldo.steinfeld@eth.ch) ETH-Zürich: **Zinc Hydrolysis for Hydrogen Production**, Forschung zur Hydrolyse von Zn wird durch Finanzmittel der ETH Zürich, Professur für Erneuerbare Energieträger (PRE) ermöglicht; www.pre.ethz.ch
- [4] R. Felder, A. Meier (anton.meier@psi.ch) PSI Villigen: **Well-to-Wheel Analysis of Solar Hydrogen Production and Utilization for Passenger Car Transportation**, Doktorarbeit am PSI, unterstützt durch die Baugarten-Stiftung und durchgeführt im Rahmen des Competence Center Energy and Mobility (CCEM-CH), Projekt **Transition to hydrogen based transportation**; www.ccem-ch.ch
- [5] A. Meier (anton.meier@psi.ch) PSI Villigen: **Leitung des IEA-Programms SolarPACES** (Solar Power and Chemical Energy Systems) (JB).

Liste der P+D – Projekte

- [6] C. Wieckert (christian.wieckert@psi.ch) PSI Villigen: **Solar Carbothermic Production of Zn from ZnO (SOLZINC)**, EU-Projekt Nr. NNS-2000-00274, 2001-2005 (SB).
- [7] A. Steinfeld (aldo.steinfeld@eth.ch) ETH-Zürich: **Solar Steam Reforming of Methane Rich Gas as NG for Synthesis Gas Production (SOLREF)**, EU-Projekt Nr. SES6-CT-2004-502829, 2004-2007. <http://www.eid2.dlr.de/solref/> (JB).
- [8] A. Meier (anton.meier@psi.ch) PSI Villigen: **Hydrogen from Solar Thermal Energy: High Temperature Solar Chemical Reactor for Co-production of hydrogen and carbon black from natural gas cracking (SOLHACARB)**, EU-Projekt Nr. 019770 (SES6), 2006-2010. <http://www.promes.cnrs.fr/ACTIONS/Europeenes/solhycarb.htm> (JB).
- [9] A. Steinfeld (aldo.steinfeld@eth.ch) ETH-Zürich: **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

Referenzen

- [10] L. O. Schunk, P. Haeberling, S. Wepf, D. Wüillemin, A. Meier (anton.meier@psi.ch), A. Steinfeld. **A Rotary Receiver-Reactor for the Solar Thermal Dissociation of Zinc Oxide**. *Proc. ES2007*, June 27-30, 2007, Long Beach, California, in press 2007.
- [11] A. Meier (anton.meier@psi.ch), C. Wieckert, A. Steinfeld. **Wasserstoff aus Wasser und Sonnenenergie – Hochtemperatur-Solarchemie**, *Bulletin SEV/VSE*, 24/25:11-17, 2005.
- [12] IPHE – International Partnership for the Hydrogen Economy, <http://www.iphe.net> (Projekt **Solar Driven High Temperature Thermochemical Production of Hydrogen**: <http://www.iphe.net/IPHE%202005%20Project%20Brochure.pdf>)
- [13] SOLLAB – Alliance of European Laboratories on solar thermal concentrating systems, <http://www.promes.cnrs.fr/ACTIONS/Sollab/presentation.htm>

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. Dazu sind auch politische Rahmenbedingungen zu schaffen, welche eine kontinuierliche Steigerung ermöglichen. In Diskussion stehen die CO₂-Abgabe auf fossilen Brennstoffen, eine kostenbasierte Einspeisevergütung für Strom aus erneuerbaren Energien und die teilweise Befreiung der Biotreibstoffe von der Mineralölsteuer. Zur Ausarbeitung des nächsten Biomasse-Forschungsprogramms, auf der Grundlage vom Konzept der Energieforschung des Bundes 2008–2011 [29], ist diese Entwicklung zu beobachten und zu berücksichtigen.

POTENZIAL UND HEUTIGE NUTZUNG

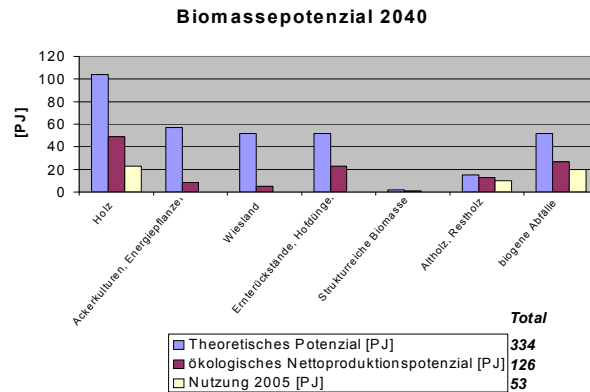
Zurzeit¹ stammen 83.8% des schweizerischen Endenergieverbrauchs aus nicht erneuerbaren Quellen (fossil und nuklear). Die Schweiz ist damit in starkem Masse vom Ausland abhängig. Zusätzlich ist an den Verbrauch fossiler Energieträger die CO₂-Problematik gekoppelt.

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

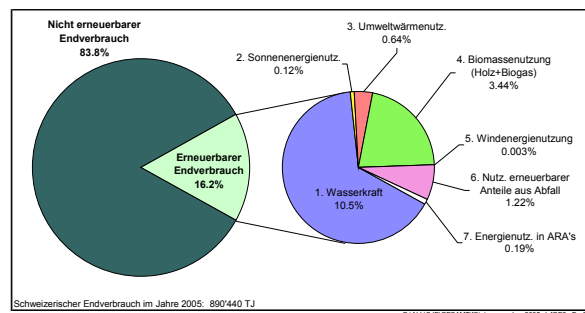
- Erreichung der CO₂-Reduktionsziele und der Ziele von EnergieSchweiz;
- Reduktion der Abhängigkeit von fossilen und anderen nicht erneuerbaren Energien;
- Versorgungssicherheit und inländischen, regionalen Wertschöpfung

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 heute bei ca. **123 PJ**, wird jedoch lediglich zu **40% (53 PJ)** energetisch genutzt (Figur 1).

Der Anteil der Biomasse am schweizerischen Endverbrauch erreichte 2005 rund 4.85% (thermisch und elektrisch, Figur 2). Das mittelfristige politische Ziel des Bundes ist jedoch mindestens



Figur 1: Potenzial Biomasse 2040 (Stand 2005).



Figur 2: Schweizerischer Endenergieverbrauch 2005.

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

¹ Schweiz. Energiestatistik 2005

² Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz, BFE 2004

³ Bruttoenergieverbrauch 2005 gemäss Energiestatistik: 1'132'660 TJ

- 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, Stromerzeugungen aus Biomasse

- Qualitätssicherung:
 - bessere Kenntnis über organische Schadstoffe in Kompost/Gärgut und über die Nutzenaspekte in Kompost/Gärgut
 - Auswertung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit Co-Vergärung
 - Diverse Projekte zur Optimierung und Schadstoffminderung bei Holzfeuerungen
- Neue Technologien:
 - Weiterentwicklung hydrothermale Vergasung: Inbetriebnahme einer Laboranlage mit kontinuierlicher Biomassezufuhr, stabile Katalysatoren, Salzabscheidung
 - erste Versuche mit KDV-Anlage
 - Verbrennungsversuche verschiedener Biomassen
- Ökobilanz von Energieprodukten
 - Abschluss Teilprojekt 1 (Datenerhebung)
 - Start Teilprojekt 2 (ökologische Bewertung mit konkreten Fragestellungen)
 - Präsentation der Resultate für Biotreibstoffe

ANVISIERTE ZIELE 2006

In Übereinstimmung mit dem Konzept der Energieforschung des Bundes [29] wurden 2006 folgende Ziele verfolgt:

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

VERFAHRENSOPTIMIERUNG

Gemäss Abschätzungen des Bundesamts für Umwelt tragen die Verbrennungsprozesse zu rund 44% zur gesamten PM10-Belastung bei. Der Anteil der Holzbrennstoffe wird auf 8% des gesamten Feinstaubes geschätzt, weitere 7% werden der offenen Verbrennung und der Verbrennung von Forstabfällen zugeordnet. Die Holzheizungen tragen damit zu 18% der Verbrennungspartikel bei, die offene Verbrennung zu 16%. Holzheizungen und offene Verbrennung verursachen zusammen annähernd gleich viel Feinstaub wie die Dieselmotoren, welche 39% der Verbrennungspartikel ausmachen. Die Holzheizungen verursachen zudem ein Mehrfaches an Feinstaub wie sämtliche Öl- und Gasheizungen, obwohl sie einen geringeren Anteil zur Wärmeerzeugung leisten. In Bezug auf die Überschreitung der Feinstaubgrenzwerte wird die Bedeutung der Holzheizungen noch dadurch verschärft, dass sie während der bezüglich Feinstaub kritischen kalten Jahreszeit betrieben werden und ihre Emissionen zudem im Siedlungsraum anfallen. Der Beitrag der Holzfeuerungen zur lokalen Feinstaubbelastung kann deshalb be-

sonders im Winter noch deutlich höher sein als im Jahresdurchschnitt in der Schweiz. Massnahmen zur Verminderung der Feinstaubemissionen aus Holzfeuerungen sind deshalb vordringlich, wobei Unterschiede bezüglich der verschiedenen Brennstoffe und Feuerungstypen zu berücksichtigen sind. Bei Feuerungsanlagen für Holz und anderer Biomasse hat die Reduktion des Staub- und Stickoxidgehaltes deshalb hohe Priorität. Im Folgenden werden die wichtigsten Projekte aufgeführt:

Das Projekt **Low-Particle Unterschubholzfeuerung** [12] zur Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln für den Leistungsbereich von 200 bis 800 kW hat aufgrund der Marktsituation im 2006 massive Verzögerungen erlitten. Die vorgesehenen Messreihen konnten erst gegen Ende Jahr an der Prototypanlage mit einer Leistung von 300 kW begonnen werden. Im 2007 wird nach der Optimierungsphase eine umfangreiche Erfolgskontrolle durchgeführt.

Mit Projekt **Regelkonzepte für bivalente Holzheizungsanlagen** [16] sollen verschiedene defi-

nierte Standarderschaltungen auf ihre Tauglichkeit in einer Feldmessung bestätigt werden. Im Erstprojekt *Azmoos* handelte es sich um eine bivalente Holzheizungsanlage mit Speicher. Im vorliegenden Messprojekt *Kaisten* wird eine Anlage ohne Speicher untersucht. Die Implementation der Regelkonzepte in der SPS des Holzkessels sowie die Realisierung der Datenaufzeichnung und Datenauswertung konnte durchgeführt werden. Während der Heizsaison 06/07 werden die Messungen durchgeführt und das Projekt im Frühsommer abgeschlossen.

Bei der **Thermische Nutzung anspruchsvoller Biomassebrennstoffe** [13] wurden im November und Dezember 2006 Versuche mit den Brennstoffsortimenten «Riedstreu + Hackschnitzel» und «Pferdemist + Hackschnitzel + Riedstreu» durchgeführt. Die Versuche zeigen, dass unter optimalen Bedingungen die beiden Brennstoffsortimente mit tiefen Emissionen und ohne wesentliche Schlackenbildung energetisch genutzt werden können. Um diese Biomassen aber in einem kommerziellen Dauerbetrieb nutzen zu können, muss gegenüber der Pilotanlage die Brennstoffförderung und das Mischen des Brennstoffes verbessert werden. Die bei den Versuchen verwendeten Mischverhältnisse können höchstens im Bandlastbetrieb eingesetzt werden. Bei einer Anlage, die leistungsgeregelt gefahren werden soll, muss der Anteil an Hackschnitzeln bei beiden Sortimenten erhöht werden. Untersuchungen zum Elektrofilter zeigen, dass der spezifische Staubwiderstand des emittierten Staubes stark vom eingesetzten Brennstoff-sortiment abhängt. Als Folge davon hängt auch der Abscheidegrad des Elektrofilters stark vom eingesetzten Brennstoff ab (Figur 3).

Sowohl Pelletheizungen wie auch solarthermische Systeme befinden sich aktuell auf einer starken Wachstumskurve. Holzenergie Schweiz geht davon aus, dass längerfristig ca. 10% des Wärmeenergieverbrauchs mit einheimischer Holzenergie gedeckt werden kann. In Kombination mit Solar-



Figur 3: Riedstreu, angeliefert als Rundballen.

wärme dürfte sich das Potential der Holzenergie zur Deckung des Wärmebedarfs um mindestens die Hälfte erhöhen. Ziel im Projekt **PelletSolar, Leistungsanalyse und Systemoptimierung** [15] ist die energetische Optimierung von Systemen, welche Pelletkessel mit Solaranlagen kombinieren. Die ersten Messresultate belegen, dass im taktenden Betrieb die Strahlungs- und Konvektionsverluste gegenüber dem stationären Betrieb deutlich höher sind. Im stationären Fall wurde ein durchschnittlicher Kesselwirkungsgrad von 84% gemessen, im taktenden Betrieb betrug der Nutzungsgrad zwischen 60 und 65%. Hinzu kommen beim taktenden Betrieb die zusätzlich benötigte elektrische Zündenergie sowie stark erhöhte Emissionswerte. Bei einem Taktzyklus mit einer einstündigen Betriebsdauer des Brenners reduziert sich der Nutzungsgrad unter Einberechnung der Zündenergie beispielsweise um 13-20%. Weitere Messresultate verdeutlichen, dass heutige Pelletkessel v.a. in den Übergangsjahreszeiten stark takteten. Es besteht Optimierungspotential, die Taktfrequenzen durch bessere Ausnutzung des Modulationsbetriebs zu minimieren. Dies setzt voraus, dass neue Regelstrategien für den Kesselbetrieb und die Speicherbewirtschaftung entwickelt und von den Herstellern eingesetzt werden.

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

[7] : Le projet a pour but de développer un concept intégré de production de biogaz et d'élimination biologique de l'ammoniac dans un contexte caractérisé par un développement de nouvelles installations de biogaz agricole. Il comporte deux phases expérimentales, utilisant chacune du lisier digéré sortant de l'installation de méthanisation de l'agriculteur partenaire du projet. La première phase a permis de tester en laboratoire un traitement aérobie afin d'oxyder complètement ou partiellement l'ammonium en nitrites. Les résultats se sont avérés très satisfaisants. La deuxième phase de ce projet consiste à reproduire les conditions aérobies qui ont mené à la formation du composé gazeux, vraisemblablement du N_2 , et à optimiser ces processus. Des bilans d'azote globaux seront effectués. Les deux hypothèses de formation du N_2 , dénitrification/dénitrification anaérobie de l'ammonium dans des zones localisées du réacteur ou dénitrification aérobie, seront aussi testées. Au terme de cette deuxième étape, la faisabilité technico-économique de la transposition à l'échelle d'une exploitation sera évaluée.

Strömungstechnische Optimierung eines Biomasse-Rührwerks [8]: Ziel des Projektes ist die strömungstechnische Optimierung eines Biomassen-Rührwerks. Erste Simulationen wurden mit

Wasser als Medium durchgeführt, woraus gezeigt werden konnte, dass die bestehende Geometrie ein grosses Verbesserungspotential hat. Eine Literaturrecherche wurde durchgeführt, mit dem Hauptziel Stoffdaten (vor allem die Viskosität) für Gülle zu bekommen. Es konnten dafür Korrelationen gefunden werden, die hauptsächlich in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt und Tierart sind. Experimentell wurde an einem Modell 1:10 gearbeitet. Für den ursprünglichen Propeller und eine optimierte Variante wurden Geschwindigkeitsverteilungen im Becken und Leistungsaufnahmen bestimmt. Ausserdem wurden verschiedene Positionierungskonfigurationen der Rotorblätter für beide Fälle getestet.

ANALYSE UND OPTIMIERUNG DER STOFFFLÜSSE

MBR-Messkampagne [6]: Ziel des Projektes ist die Abklärung der Eignung des Membranreaktors (MBR) zur Vergärung sowohl von Gülle als auch von Gülle und Co-Substraten. Anhand von Laboruntersuchungen und einer Versuchsanlage wurden Erkenntnisse erarbeitet, die in den Betrieb einer P&D-Anlage einfließen sollen. Die Versuchsanlage ist prozesstechnisch geprüft und in Betrieb gesetzt worden. Für den Betrieb des MBR wurde separierte Dünngülle bzw. zerkleinerte Co-substrate verwendet. Die Ultrafiltration mit organischen Membranen ist direkt mit dem Fermenter gekoppelt betrieben worden. Die Biomasse kann im Fermenter vollständig zurückgehalten werden. Dies erlaubt eine Reduktion des Fermentervolumens um rund 75%. Die Gasproduktion und die Raumbelastung im MBR sind mit konventionellen Biogasanlagen vergleichbar.

Die verfahrens- und prozesstechnischen Bedingungen an den MBR lassen sich ohne weiteres in die Praxis umsetzen. Das MBR-System zeichnet sich durch eine hohe Anpassungsfähigkeit an die entsprechenden Rohsubstrate aus. Die Kombination einer energetischen und stofflichen Behandlung mit dem MBR zeigen zusätzliche Vorteile, wie erheblich kleinere Lagervolumen und deutlich geringere Transport- und Ausbringkosten, wenn eine Umkehrosmose als Endstufe vorgesehen ist. Bei Beachtung der Verwertungskosten des Gärsubstrats liegen die Kosten je nach betrieblichen Voraussetzungen im Bereich der konventionellen Vergärung. Zusätzlich lassen sich die Nährstoffe effizienter einsetzen sowie allenfalls Mineraldünger ersetzen.

Aufgrund der beschriebenen Widrigkeiten bei der Versuchsdurchführung konnte das Potential des MBR-Verfahrens nicht abschliessend beurteilt werden. Durch eine länger angelegte Versuchsreihe könnten viele der offenen Fragen vertiefter beantwortet werden.

Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz [9]: In der Schweiz wer-

den 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 wird 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 Klärschlammdeponierung in die Böden begründet. Eine ähnliche Entwicklung muss bei Kompost und Gärgut wegen deren grossen ökologischen und volkswirtschaftlichen Bedeutung unbedingt vermieden werden. Die Ergebnisse werden anlässlich eines wissenschaftlichen Kongresses Anfang 2008 der Öffentlichkeit vorgestellt.

Auswirkungen von Komposten und Gärgut auf die Umwelt, Bodenfruchtbarkeit und Pflanzengesundheit [10]: In der Schweiz werden zurzeit rund 600'000 t TS biogene 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 EPFL bzw. EAWAG und der FAL koordiniert. Auch diese Ergebnisse werden anlässlich des oben erwähnten wissenschaftlichen Kongresses Anfang 2008 der Öffentlichkeit vorgestellt.

Methanverluste bei der Biogasaufbereitung [11]: Um von den Vorteilen aufbereiteten Biogases in den Bereichen Lufthygiene, Klima, Versorgungssicherheit, Unabhängigkeit und Preisstabilität profitieren zu können, ist ein gut funktionierendes Aufbereitungssystem mit kleinstmöglichen Verlusten die Voraussetzung. Für die Aufbereitung von Biogas zu Erdgasqualität ist neben der Reinigung und Trocknung auch die Entfernung von CO₂ bzw. eine Aufkonzentrierung von Methan erforderlich, bei der es zu klimarelevanten CH₄-Emissionen kommen kann. Die mit der Biogasaufbereitung verbundenen potenziellen und tatsächlichen Methanverluste werden im Rahmen des Projekts anhand verschiedener Anlagentypen untersucht. Die Projektgruppe, die sich aus Experten aus Forschung, Messtechnik, Gasvertrieb und Energieverwendung zusammensetzt, erarbeitet eine Studie, die die derzeitigen und zukünftigen Aufbereitungsanlagentypen auch im Hinblick auf

Kosten, Energieeffizienz und Umsetzbarkeit gegenüberstellt. Dabei stehen aktuelle Emissionsmessungen an mehreren modernen Schweizer Aufbereitungsanlagen im Vordergrund. Aus den Resultaten werden Massnahmen zur Emissionsverminderung und -vermeidung abgeleitet und Empfehlungen für ein zukünftiges Vorgehen bei der Aufbereitung von Biogas in der Schweiz abgeleitet.

NEUE UMWANDLUNGSTECHNOLOGIEN

Im Projekt **Biogenes Methan durch hydrothermale Vergasung** [4] wird ein hydrothermales Vergasungsverfahren für nasse Biomassesortimente entwickelt, mit dem Ziel, die Biomasse vollständig zu Methan und CO_2 zu vergasen und Nährsalze zurück zu gewinnen. Nachdem Anfang 2006 mit 2% Ru/C ein aktiver und stabiler Katalysator gefunden wurde, wurde als weiterer Härtestest die Salzverträglichkeit durch Zugabe von Natriumsulfat zur Biomasselösung detailliert untersucht. Bereits bei geringen Mengen an Natriumsulfat wurde der Katalysator deaktiviert. Es wurden schrittweise Versuche durchgeführt, um den einen oder anderen Deaktivierungsmechanismus auszuschliessen. Die momentane These, mit der alle Beobachtungen vereinbar sind, lautet: während des Biomasseabbaus wird das Edelmetall auf dem Katalysator von der Oxidationsstufe IV zur Oxidationsstufe II reduziert, und wieder durch Wasser auf die Stufe IV oxidiert. Bei diesem Prozess kommen vermutlich auch Zwischenstufen vor. Eine solche Zwischenstufe, Ru^{III} , ist bekannt dafür, mit Sulfat sehr stabile Komplexe einzugehen. Die These ist nun, dass Sulfat irreversibel an das Edelmetall bindet und dieses Zentrum so maskiert. Es steht folglich nicht mehr für den Biomasseabbau zur Verfügung. Sind genug Zentren maskiert, ist keine Umsetzung mehr möglich. Reaktivierungsversuche mittels Wasserstoffperoxidlösungen (1%) waren erfolgreich. Das Ruthenium wird so wieder oxidiert, und das Sulfat sollte in Lösung gehen und vom Fluidstrom abtransportiert werden. Der Aufbau der kontinuierlichen Laborapparatur für reelle Biomasse wurde abgeschlossen. Erste Vergasungsversuche mit Ethanol über Ru/C wurden durchgeführt. Das Konzept der Salzausschleusung funktioniert, bedarf aber noch einer Überarbeitung (kontinuierlicher Betrieb zur Zeit nur ca. eine Stunde möglich).

Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes im unteren Leistungsbereich mit eigener Ölmühle [5]: Der Einsatz von unverändertem Pflanzenöltreibstoff im Fahrzeug- und Stationärmotor erfährt als nachwachsende Energiequelle und Produktionsnische für die Landwirtschaft zunehmende Bedeutung. Die wenigen, bisher verfügbaren pflanzenöлтаuglichen Motorumrüstungen erfüllen indessen die aktuellen Abgasvorschriften nicht. Für Pflanzenöl-BHKW im Leistungsbereich

von 50 bis 500 kW besteht zudem eine Angebotslücke. Ein breit abgestütztes Konsortium will deshalb ein mit Rapsöl betriebenes Blockheizkraftwerkes (BHKW) mit eigener Ölversorgung entwickeln, welches die Schweizer Abgasnormen erfüllt. Die Berichtsperiode ist geprägt durch die umfangreiche Messreihe mit dem Projektmotor an der HTI Biel, den Aufbau der vollständigen Forschungs-Ölmühle in Suberg bei Lyss und die Würdigung des Projektes mit dem Prix Evenir, dem Nachhaltigkeitspreis der Erdölvereinigung. Dem spontan entstandenen Anspruch der Erdölvereinigung, als Initiantin und Stifterin des verliehenen Prix Evenir, die Chance der Verfügbarkeit eines neu entwickelten Dieselmotors aus renommiertem Hause auf einem Referenzprüfstand zu ergreifen, um eine wesentlich erweiterte Messreihe durchzuführen, musste entsprochen werden, obschon dem Projekt dadurch mehrmonatige Verzögerungen entstehen, hingegen ebenso ein substantieller Mehrwert ohne zusätzliche Kosten. Die bisherigen Messresultate bestätigen die vermutete Pflanzenöleignung des Projektmotors, der zusätzlich mit Rapsöl raffiniert, Dieseldieselkraftstoff, GTL, RME und ebenfalls mit den Mischungen von 10 % GTL, RME und Rapsöl in Dieseldieselkraftstoff sowie verschiedenen Motorenölen geprüft wurde.

Im EU-Projekt **Bio-Pro** [20] fokussiert sich der Schweizer Partner auf die Entwicklung der Brennertechnologie mit flammloser Oxidation der Firma **WS-Wärmeprozessstechnik** (D). Diese Weiterentwicklung des FLOX-Brennerkonzeptes erreicht auch bei biogenen Brennstoffen sehr tiefe Stickoxid-Emissionen (NO_x). Die NO_x -Emissionen lagen in weiten Teilen des Betriebes bei unter $10 \text{ mg/m}^3\text{n}$ (bezogen auf NO_2 und 3% Restsauerstoff) und noch tieferen CO -Emissionen. Der Combustor zeichnet sich durch folgende Verbesserungen aus: Die Leistungsdichte konnte auf bis zu $20 \text{ MW}/(\text{m}^3 \text{ bar})$ erhöht werden. Der Brenner ist zudem ohne separaten Startbrenner betreibbar und kann wegen seiner Kompaktheit auch in Mikro-Turbinen-Brennkammern eingesetzt werden. Ein wichtiger Entwicklungserfolg war der Nachweis der Funktionsfähigkeit bei extremen Schwachgasen. Mit einem modifizierten Brenner mit vergrößerter Brennkammer konnten mit nur 300°C Verbrennungsluft-Vorwärmung Gase mit einem Heizwert von $2.2 \text{ MJ/m}^3\text{n}$ und hohem CO_2 -Anteil vollständig bei stabiler Flamme verbrannt werden. Das Projektziel lag bei $4 \text{ MJ/m}^3\text{n}$. Auf Grund der grossen Nachfrage nach der Publikation dieser Resultate wurde eine Feldtest-Abfackelungsanlage für Deponiegase mit geringem Heizwert konstruiert. Die Fackel läuft seit dem 8. November 2006 auf einer kantonalen Deponie im Kanton Tessin im Versuchsbetrieb (Figur 4).

Das Projekt **katalytische Direkt-Verflüssigung (KDV)** [17] von Biomasse wurde abgebrochen. Die erwartete Ausbeute dieser Pyrolysetechnik lag so



Figur 4: Fackel im Versuchsbetrieb auf einer kantonalen Deponie im Kanton Tessin.

weit unterhalb des angestrebten Zielwertes, dass kaum reelle Chancen bestehen, Wirkungsgrade zu erreichen, welche den energiepolitischen Zielen des Bundes (> 50% – 60%) entsprechen. Das Projekt wurde auf Ende 2006 abgebrochen und ein Schlussbericht wird im Frühjahr erwartet.

GRUNDLAGEN, STUDIEN, KONZEPTE

Ökobilanz von Energieprodukten [1]: Im Rahmen von verschiedenen Studien wurden bis heute Energieprodukte hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen untersucht. Dabei wurden nicht erneuerbare (fossile) Energieträger untereinander, aber auch mit erneuerbaren verglichen. Die Untersuchungen aus der Schweiz beschränken 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 zu erarbeitenden Ökoinventare werden modular (Prozesse bzw. Prozessketten) aufgebaut, sodass eine Erweiterung und eine Bilanzierung

von weiteren Anwendungsfällen einfach möglich sind. Die Sachbilanzdaten werden in den Datenbestand der *ecoinvent* Datenbank integriert. Dieses Projekt wird in Zusammenarbeit mit dem BAFU und dem BLW durchgeführt. Erste Resultate zu den untersuchten Biotreibstoffen wurden am 28.11.2006 anlässlich des LCA Diskussionsforums *Biofuels* präsentiert.

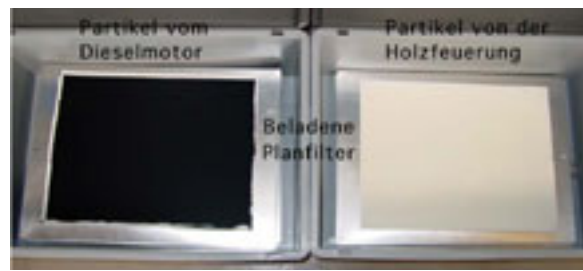
RENEW - Life Cycle Assessment for BTL-fuel production [2]: Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes RENEW (*Renewable Fuels for Advanced Powertrains*) werden Verfahren für die Herstellung von Treibstoffen aus Biomasse mittels Vergasung und anschliessender Fischer-Tropsch Synthese entwickelt. Die verschiedenen 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 mit der Datenerhebung für die Biomasseproduktion und die Syntheseverfahren begonnen.

RENEW - Erzeugung von synthetischem Erdgas aus Holz, Stroh und Black liquor zur Nutzung als Biotreibstoff [3]: Ziel des EU-Projekts ist die Weiterentwicklung und die Bewertung unterschiedlichster Herstellverfahren für Biotreibstoffe der zweiten Generation. Im Vordergrund stehen flüssige Treibstoffe wie synthetischer Diesel und Benzin, Dimethylether (DME), Methanol und Ethanol, die aus Holz, Stroh oder Black liquor (Schwarzlauge) hergestellt werden. Als gasförmiger Treibstoff wird zu Vergleichszwecken synthetisches Erdgas betrachtet. Alle diese Treibstoffe werden über einen katalytischen Prozess aus Synthese- bzw. Produktgas hergestellt. Je nach erwünschtem Treibstoff muss ein anderer Katalysator verwendet und das Synthesegas entsprechend gereinigt und konditioniert werden. Das Ziel des Arbeitspakets 5.5 ist die Erarbeitung von technischen Konzepten für die Umwandlung von Biomasse in synthetisches Erdgas. Darauf aufbauend sollen techno-ökonomische Daten für viel versprechende Herstellverfahren bereitgestellt werden. Das PSI ist für dieses Arbeitspaket verantwortlich.

Partikel aus vollständiger Holzverbrennung sind grösstenteils Salze, während Partikel von Dieselmotoren hauptsächlich aus Russ bestehen (Figur 5). Das interdisziplinäre Forschungsprojekt **Wirkung von Verbrennungspartikeln** [12] liefert einen Beitrag zum Vergleich der Gesundheitsrelevanz von Abgaspartikeln aus vollständiger Holzverbrennung, aus unvollständiger Holzverbrennung sowie aus Dieselmotoren. Die Untersuchungen zeigen unter anderen das weitgehend anorganische Feinstaub aus der vollständigen Verbrennung von naturbelassenem Holz in einer automatischen Holzfeuerung eine mindestens

fünf- bis zehnfache geringere Reaktion von Zelltoxizität aufweist als der untersuchte Dieselmotor. Feinstaub aus sehr schlechter Verbrennung weist eine rund zehnfach höhere Reaktion von Zelltoxizität, und rund 20-fach höhere PAK-Gehalte auf als Dieselmotor. Im Vergleich zu anorganischem Holzstaub ist die Reaktivität rund ein Faktor 100 höher. Zur Reduktion der Staubemissionen aus Holzfeuerungen muss deshalb nicht nur das Abfallverbrennungsverbot, sondern auch für naturbelassenes Holz ein sachgerechter Betrieb umgesetzt werden.

Die Studie **Dezentrale Stromerzeugung mit Feststoff-Biomasse** [20] evaluiert den technischen Forschungsstand und die Wirtschaftlichkeit von Wärme-Kraft-Koppelungsanlagen im Leistungsbereich $< 1 \text{ MW}_{\text{th}}$ aus Feststoff-Biomasse. Zu den



Figur 5: Partikel von Dieselmotor und Holzfeuerung auf beladene Planfilter.

technischen Abklärungen wurden auch Potenzialabschätzungen und betriebswirtschaftliche Daten erhoben. Die ökonomische Betrachtung dieser Anlagen zeigt eine geringe Wirtschaftlichkeit mit hoher Abhängigkeit der Brennstoffkosten.

Nationale Zusammenarbeit

Die meisten Projekte wurden direkt mit der Industrie und zusammen mit diversen Fachhochschulen, den ETH oder privaten Organisationen durchgeführt. 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.

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).

Die Programmleiter haben sich im Berichtsjahr anlässlich eines Besuchs der verschiedenen Akteure über die heutige Situation in der Biomasse-Forschung informieren lassen. Ziel der Programmleitung war es, sich einen Überblick zu verschaffen, welche Institute, Firmen oder Forschenden in welchen Bereichen der Biomasse-Forschung über entsprechende Kompetenzen verfügen. Der Besuch sollte ausserdem allfälligen Forschungsbedarf aus der Sicht der Forschenden aufzeigen und Diskussionen über zukünftige Entwicklungen und Tendenzen ermöglichen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen einerseits als Basis für die Strategieentwicklung im Bereich Biomasse und andererseits für die Erarbeitung des Forschungskonzepts 2008-2011 des Bundes.

Aufgrund der während des Berichtsjahres bereits durchgeführten Gespräche durfte die Programmleitung generell eine hohe Kompetenz der Forschenden im Bereich Biomasse bzw. Biomasseenergie feststellen. Da aus zeitlichen Gründen noch nicht alle geplanten Besuche stattfinden konnten, sollen die Gespräche auch im Folgejahr weiter geführt werden.

Es ist vorgesehen, in enger Zusammenarbeit mit der neu ins Leben gerufenen Begleitgruppe Biomasse (BioBG) und den aus den Gesprächen mit den Forschenden «an der Front» gewonnenen Erkenntnisse das Forschungskonzept 2008-2011 des Bundes zu erarbeiten.

Internationale Zusammenarbeit

Die Schweiz beteiligte sich auch im Berichtsjahr im Rahmen des Implementing Agreements Bio-energy der International Energy Agency (IEA) an 3 Tasks:

- Task 32: **Biomass Combustion and Co-firing** [12]
- Task 33: **Thermal Gasification of Biomass** [13]
- Task 37: **Energy from Biogas and Landfill Gas** [14]

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** [13]: <http://www.thermalnet.co.uk/>
- **QM-Holzheizwerke** [12]: www.qmholzheizwerke.ch
- **Biopro** [20]: www.eu-projects.de

Pilot- und Demonstrationsprojekte

VERFAHRENSOPTIMIERUNG

Kompakt-Biogasanlage für die Landwirtschaft mit effizienter BHKW-Technik [22]: Nach verschiedensten bautechnischen Abklärungen konnte im Januar 2005 mit den Bauarbeiten der Biogasanlage begonnen werden. Bis im August 2005 waren die Bauarbeiten soweit fortgeschritten, dass die Inbetriebnahme der Anlage erfolgen konnte. Bereits im November 2005 produzierte die Anlage durchschnittlich 845 m³ Biogas pro Tag. Trotzdem wurden in verschiedenen Bereichen Betriebsoptimierungen durchgeführt. Das Gülle-Management mit der Zuführung von Co-Substraten wurde zum Beispiel vereinfacht. In den folgenden Monaten wurde die Beschickung der Anlage kontinuierlich gesteigert. Die Zusammensetzung der Co-Substrate änderte im Laufe der Zeit. Heute werden in der Anlage neben Hofdünger mehrheitlich Co-Substrate wie Getreideabgang, Kaffeesatz, Früchte, Gemüse, Maisabgang, MilCHFett, Pansen und Darminhalte verwertet. Die Auslastung des Blockheizkraftwerkes (BHKW) konnte im Laufe des letzten Jahres seit Inbetriebnahme kontinuierlich gesteigert werden. Die Messwerte der letzten sieben Monate (März 2006 bis September 2006) verzeichnen eine BHKW-Auslastung von rund 98%. Demzufolge ist die jetzige Anlagenkapazität beinahe ausgereizt und die Möglichkeit für eine Anlagenerweiterung gegeben.

Monovergärung von Glycerin [23]: Im Rahmen dieses Projekts soll untersucht werden, wie eine Vergärungsanlage konzipiert und betrieben werden müsste, 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 sollen untersucht und entsprechende Lösungen aufge-

zeigt werden. Ziel ist, das Anwendungsgebiet der anaeroben Vergärung zu erweitern und für die dezentrale Verwertung von spezifischen Substraten in grösseren Mengen eine entsprechende Lösung anbieten zu können. Es ist zu erwarten, dass solche Anlagen kleiner und effizienter werden. Sie können dadurch vor Ort eingesetzt werden, womit gleichzeitig Transporte eingespart werden können.

ANALYSE UND OPTIMIERUNG DER STOFFFLÜSSE

MBR-Pilot [21]: Die P&D-Anlage zur Vergärung von Schweinegülle und Abfällen mit zusätzlicher Nährstoffaufbereitung konnte infolge des strengen Winters 05/06 erst Ende des Berichtsjahres fertig gestellt werden. Sie wird 2007 ans Netz gehen. Die installierte Leistung beträgt 1.1 MW_{el}. Die Anlage wurde seit Oktober 2006 schrittweise angefahren. Die Nährstoffaufbereitung (Dekanter, Ultrafiltration und Umkehrosmose) wurde erfolgreich in Betrieb genommen. Die volle Leistung der Anlage wird frühestens ab Februar 2007 erreicht.

NEUE UMWANDLUNGSTECHNOLOGIEN

SwissFarmerPower [24]: 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. Ende Berichtsjahr wurde die *SwissFarmerPower Inwil AG* gegründet und die Baueingabe für die grösste Biogasanlage der Schweiz eingereicht. In der Anlage soll ab Frühjahr 2008 aus Gülle und

Mist sowie biogenen Reststoffen umweltfreundlicher Treibstoff hergestellt werden. Beteiligt an der Firma sind nebst rund 80 Bauern, die *fena-co* (Unternehmensgruppe der Schweizerischen Agrarwirtschaft), die Erdgas Zentralschweiz AG, die *Weiherhus-Kompost AG* und die *CTU-Concepte Technik Umwelt AG*.

Biogasbetriebene Gelenkautobusse in Bern [25]: 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 erstellt und mit ersten Messungen/Erhebungen begonnen.

Biogaz agricole – Installation de production de biogaz à partir de fumier et autres cosubstrats [26]: Das Projekt hat in der Bevölkerung Widerstände hervorgerufen, wodurch sehr grosse Verzögerungen entstanden sind und das Projekt schliesslich zum Scheitern brachte. Leider musste das Vorhaben Ende Berichtsjahr abgebrochen werden.

Feststoffvergärung in der Schweiz [27]: In der Schweiz werden zurzeit vermehrt Biogasanlagen realisiert. Die realisierten Anlagen für gewerblich-industrielle Zwecke basieren vorwiegend auf dem Prinzip von Kompogas (Feststoffvergärung). In der Landwirtschaft werden Anlagen gebaut, die flüssigen Hofdünger (Gülle) mit Co-Substraten zur Produktion von Biogas nutzen (Flüssigvergärung). Von Landwirtschaftsbetrieben ohne Tierhaltung, welche keine flüssigen Hofdünger zur Verfügung haben, besteht die Nachfrage nach Vergärungsanlagen, welche feste, stapelbare organische Reststoffe direkt verwerten können. Das Ziel dieser Studie ist deshalb, die Erfahrungen mit

Anlagen im In- und Ausland zusammenzufassen und auszuwerten, um die Einsatzmöglichkeiten der Feststoffvergärung in der Schweizer Landwirtschaft einschätzen zu können. Die Untersuchungen zeigen, dass die derzeitigen Feststoffvergärungsverfahren für den Einsatz in der Schweizer Landwirtschaft noch nicht wirklich angepasst (kontinuierlich betriebene, gewerblich-industrielle Anlagen, welche in der Abfallentsorgung eingesetzt werden) oder ausgereift (einfache, diskontinuierliche Verfahren) sind. Die Flüssigvergärungsanlagen sind derzeit, unter anderem durch die Möglichkeit der Zugabe von festen Substraten, konkurrenzfähiger als die verschiedenen Feststoffvergärungsanlagen. Die Feststoffvergärung wird jedoch als Technologie mit hohem Entwicklungspotential gesehen.

Aufbereitungs- und Betankungsanlage für kleinere Biogasproduktionsmengen [28]: 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 Druckwechselsorption. Der Vergleich der Verfahrenseigenschaften zeigt, dass sich grundsätzlich alle drei Verfahren eignen. Sie sind in unterschiedlichen Entwicklungsstadien, um für 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.

Die Holzvergasungstechnologie scheint sich aufgrund besserer Rahmenbedingungen langsam dem Markt zu nähern. Im Januar 07 geht *Woodpower* [19] mit einem Holzvergaser von *dasagren* ans Netz und eine Anlage von *Pyroforce* soll ab Herbst 07 Ökostrom und Wärme liefern. Dazu wurde von *Pyroforce Energietechnologie AG* ein Auftrag zur **Erarbeitung von Grundlagen für die Zertifizierung von Strom aus Holz-WKK mit Festbett-Gleichstrom-Vergaser** [18] genommen.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

- Qualitätssicherung:
 - Kompost-/Gärgut-Projekte: erste Erkenntnisse liegen vor. Sie werden anlässlich eines wissenschaftlichen Kongresses Anfang 2008 vorgestellt.
 - landwirtschaftliche Biogasanlagen mit Co-Vergärung: ein weiteres Projekt konnte erfolgreich abgeschlossen werden; der entsprechende Schlussbericht und die Auswertungen liegen vor.
 - Mit drei Projekten konnte weiteres Wissen für Optimierungen und Schadstoffminderungen ausgebaut und im Rahmen des Holzenergie-Symposiums weitervermittelt werden.

- Neue Technologien:
 - hydrothermale Vergasung: die Inbetriebnahme einer Laboranlage mit kontinuierlicher Biomassezufuhr ist mit Verspätung erfolgt; das Konzept der Salzausschleusung funktioniert, bedarf aber noch einer Überarbeitung.
 - Die Untersuchungen an der KDV-Anlage ergaben ernüchternde Resultate. Die erwartete Ausbeute dieser Pyrolysetechnik lag so weit unterhalb des angestrebten Zielwertes, dass kaum reelle Chancen bestehen, Wirkungsgrade zu erreichen, welche den energiepolitischen Zielen des Bundes entsprechen.
 - Eine erste Serie von Verbrennungsversuchen anderer Biomasse als Holz konnte erfolgreich durchgeführt und dokumentiert werden. Auch hier gibt es noch offene Fragen betreffend Einhaltung der Luftreinhalteverordnung.
- Ökobilanz von Energieprodukten
 - Teilprojekt 1 (Die Datenerhebung konnte abgeschlossen werden - inkl. der während der Erarbeitung der Fragestellungen für die ökologische Bewertung zusätzlich erhobenen Datensätze).
 - Teilprojekt 2 (ökologische Bewertung) konnte wie geplant gestartet und erste Resultate über Biotreibstoffe präsentiert werden.

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 Haupthemmnisse zur weiteren Verbreitung. Im Berichtsjahr blieben die konventionellen Energiepreise 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 Qualitätssicherung 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 Holzvergaser-Anlagen sind bereits in Planung und eine weitere ist im Frühjahr 2007 in Betrieb gegangen.

Vergärung: Das Interesse am Bau von landwirtschaftlichen Biogasanlagen hat im Berichtsjahr erneut stark zugenommen. Obwohl die Streichung der P+D-Mittel hemmend wirkt, konnten einige Anlagen den Betrieb aufnehmen und daraus wertvolle Erfahrungen gesammelt werden. Im Hinblick auf eine kostenbasierte Vergütung für Strom sind weitere Anlagen in Planung. 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 sieht unter anderem eine zonenkonforme Bewilligung von Anlagen zur Erzeugung von Energie aus Biomasse in der Landwirtschaft vor. Diese Anpassungen sind nun vom Parlament beschlossen. Diese Beschlüsse sind 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 Zusammenhang mit der neuen **Biomasse-Potenzialstudie** [30] 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 noch im Berichtsjahr gestartet werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 vorhanden

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

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

- [1] N. Jungbluth (jungbluth@esu-services.ch), ESU-services, Uster: a) **Vorstudie «Ökobilanz von Energieprodukten»** (SB) b) **Hauptstudie «Ökobilanz von Energieprodukten» (Teilprojekt 1)** (JB) <http://www.esu-services.ch/>.
- [2] N. Jungbluth (jungbluth@esu-services.ch), ESU-services, Uster: **RENEW - Life Cycle Assessment for BTL-fuel production** (JB) <http://www.renew-fuel.com>.
- [3] S. Biollaz (serge.biollaz@psi.ch), PSI Villigen: **RENEW - Erzeugung von synthetischem Erdgas aus Holz, Stroh und Black liquor zur Nutzung als Biotreibstoff** (JB) <http://www.renew-fuel.com>.
- [4] F. Vogel (frederic.vogel@psi.ch), PSI Villigen: **Biogenes Methan durch hydrothermale Vergasung** (JB) <http://www.psi.ch/>.
- [5] M. Meyer (martin.meyer@shl.bfh.ch), Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, SHL, Zollikofen: **Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes im unteren Leistungsbereich mit eigener Ölmühle** (JB) <http://www.shl.bfh.ch/>.
- [6] Hersener/Meier (hersener@agrenum.ch), ARGE UF-Membran, c/o Ingenieurbüro HERSENER, Wiesendangen: **Vergärung von Gülle im Membran-Bioreaktor (MBR-Messkampagne)** (JB).
- [7] 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** (JB).
- [8] E. Casartelli (ecasartelli@hta.fhn.ch), HTA, Luzern: **Strömungstechnische Optimierung eines Biomasse-Rührwerks** (JB).
- [9] T. Kupper (thomas.kupper@eawag.ch), EAWAG, Dübendorf: **Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz** (JB).
- [10] J. Fuchs (jacques.fuchs@fibl.ch), FiBL, Frick: **Auswirkungen von Komposten und Gärgut auf die Umwelt, Bodenfruchtbarkeit und Pflanzengesundheit** (JB).
- [11] U. Baier (u.baier@hsw.ch), Hochschule Wädenswil HSW, Wädenswil: **Methanverluste bei der Biogasaufbereitung** (JB).
- [12] 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) **Wirkung von Verbrennungspartikeln** (SB).
- [13] 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).
- [14] 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>
- [15] L. Konersmann, (info@solarenergie.ch), SPF Rapperswil, **Pelletsolar** (JB)
- [16] H.R. Gabathuler, (gabathuler.ag@bluewin.ch), Diessenhofen: **Regelkonzepte für bivalente Holzheizungsanlagen** (JB)
- [17] H. Ott, W. Müller Konstruktionen AG, Flaach, **Katalytischen Direkt-Verflüssigung (KDV)** (JB).
- [18] H. Gemperle, www.pyroforce.ch, Emmenbrücke: **Vergaseranlage Pyroforce** (JB).
- [19] Oliver Bosshard, o.bosshard@woodpower.ch, Wila
- [20] C. Gaegauf, M. Schmid, www.oekozentrum.ch, Langenbruck: a) **Bio-Pro** (JB) • b) **Dezentrale Stromerzeugung mit Feststoff-Biomasse** (SB).

Liste der P+D-Projekte

- [21] Jakob Bösch AG, Schwellbrunn und Hersener/Meier (hersener@agrenum.ch), ARGE MBR, c/o Ingenieurbüro HERSENER, Wiesendangen: **Vergärung von Gülle im Membran-Bioreaktor (MBR-Pilot)** (JB).
- [22] Bruno Liesch (bruno.liesch@ines-energy.ch), INES Ingenieurbüro, Bern: **Kompakt-Biogasanlage für die Landwirtschaft mit effizienter BHKW-Technik** (JB).
- [23] M. Spicher (spicher@genesys.ch), Genesys GmbH, Frauenfeld: **Monovergärung von Glycerin** (-)
- [24] U. Brücker (ub@itz.ch), ARGE Swiss Farmer Power, Horw: **SwissFarmerPower «Biogas vom Bauer wird zum Treibstoff von morgen»**, www.swissfarmerpower.ch
- [25] P. Maurer (peter.maurer@bernmobil.ch) Bernmobil, Bern: **Biogasbetriebene Gelenkautobusse in Bern** (JB).
- [26] R. Bettex (info@fromagerie-bettex.ch), Champtauroz: **Installation de production de biogaz**.
- [27] C. Müller und B. Liesch (info@ines-energy.ch), INES Ingenieurbüro für nachhaltige Energiesysteme, Bern: **Feststoffvergärung in der Schweiz** (JB).
- [28] U. Oester (info@apex.eu.com), Apex AG, Däniken: **Aufbereitungs- und Betankungsanlage für kleinere Biogasproduktionsmengen** (JB).

Referenzen

- [29] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 bis 2007**, ausgearbeitet durch die Eidg. Energieforschungskommission CORE, 1. Januar 2004, www.bfe.admin.ch
- [30] **Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz**, BFE, Dezember 2004.

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM KLEINWASSERKRAFTWERKE

Manuel Buser

pl@smallhydro.ch



Mehr Energie und mehr Ökologie

Durch den Neubau des Kleinwasserkraftwerks Buchholz in Gossau / Flawil SG, bei dem die erste Fischschleuse der Schweiz errichtet wurde, kann erstmals seit über 100 Jahren die Fischdurchgängigkeit der Glatt wieder gewährleistet werden. Im Bild die Einrichtungen beim Schleusenausgang.

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 KMU und private Organisationen ein.

Auch die Fachhochschulen, die ETH Lausanne, die Universität Bern und die Universität Stuttgart arbeiteten 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 [11] ist es, Innovation und Know-how im Schweizer Kleinwasserkraft-Sektor zu stärken. Damit sollen kostengünstige, angepasste Lösungen für jene Potenziale entwickelt werden, welche zur Zeit noch nicht wirtschaftlich erschlossen werden können.

Prioritäre Forschungsgebiete sind:

- Optimierte Turbinen / Pumpen als Turbinen
- Niederdruck-Innovationen
- Steuerungs- und Messtechnik
- Drehzahlvariable Technologie
- 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. Das quantitative Ziel im Jahresplan [12] war angesichts der geringen Mittel vorsichtig gewählt: es sollte mindestens ein neues Projekt gemäss Vierjahresprioritäten gestartet werden. Tatsächlich wurden 2 neue Projekte lanciert.

Für den P&D-Bereich liegen die Schwerpunkte bei Anlagen, die bezüglich Umweltverträglichkeit mustergültig sind, und bei innovativen Trink- und Abwasserkraftwerken. Da seit rund 3 Jahren nicht mehr in neue P&D-Projekte investiert werden konnte, werden im Jahr 2007 die P&D-Aktivitäten zum Erliegen kommen, sofern die Budgets nicht wieder aufgestockt werden. Dass Energieforschung mit begleitenden Pilotprojekten gerade bei den marktreifen Technologien ihre Wirkung wesentlich steigern könnte, wird zunehmend auch in politischen Kreisen erkannt.



Gemeinsames Label für das EnergieSchweiz-Förderprogramm und die Kleinwasserkraft-Forschung

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

OPTIMIERTE TURBINEN- UND PAT-KONZEPTE

Gleich mehrere Projekte befassen sich mit Turbinentechnologie, der Königsdisziplin der Wasserkraft, und widerlegen so die oft geäußerte Behauptung, eine solch alte Technologie müsse bereits erschöpfend erforscht worden sein. Die Bezeichnung «optimiert» bringt zum Ausdruck, dass es sich hier um Kleinwasserkraft-spezifische Forschungsthemen handelt. So ist beispielsweise ein hoher Wirkungsgrad zwar wichtig, da sich jedes Prozent Verlust direkt und vollumfänglich auf den Ertrag auswirkt. Damit Kleinwasserkraft-Projekte aber schlussendlich realisiert werden – und dafür ist die Kleinwasserkraft bekannt –, ist nicht der Wirkungsgrad ausschlaggebend, sondern das Verhältnis von Kosten zu Ertrag.

Seit einiger Zeit werden als kostengünstige Lösung rückwärtslaufende Pumpen eingesetzt. Eine wesentliche Hürde bleibt jedoch die Schwierigkeit, das Verhalten der Maschinen genau vorherzusagen. Das Projekt **Charakteristiken von Pumpen im Turbinenbetrieb** [2] der Fachhochschulen Genf und Sitten erforschte neue Methoden, um diese Lücke zu schließen.

Dazu wurde ein mathematisches Modell erarbeitet, welches aufgrund der Geometrie der Maschine die Fallhöhenverluste voraussagt. Mit diesem Modell wurde das Verhalten im Turbinenbetrieb errechnet. Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit Sulzer Pumps durchgeführt. In der letzten Projektphase wurde ein Berechnungsprogramm auf Excel-Basis entwickelt, das Interessenten

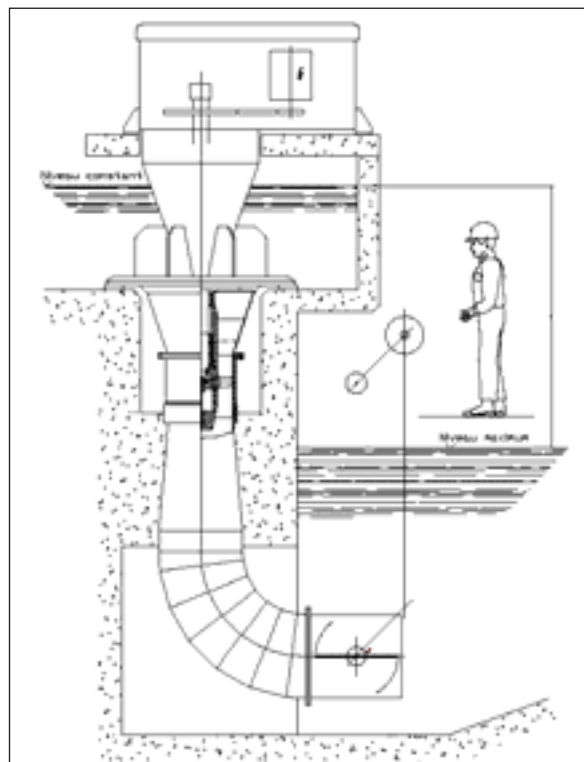
	A	B	C	D	E
1		Predicted	Manufactu	Shift(%)	
2	H(m)	121.230	120.500	-0.606	
3	Q(m³/s)	0.086	0.086	0.694	
4	Efficiency(%)	0.736	0.769	4.307	
5	Power out (kW)	74.947	78.393	4.396	
6					
7					

Figur 1: Excel-Programm zur Vorausberechnung von PAT-Kennndaten. (Bild: Ecole d'ingénieurs de Genève).

erlaubt, die Pumpenberechnungen aufgrund der Gehäuse- und Laufradgeometrie praktisch durchzuführen (Figur 1). Das Programm inkl. Dokumentation ist kostenlos bei der Programmleitung Kleinwasserkraftwerke erhältlich.

Standardpumpen sind namentlich für Trinkwasserkraftwerke interessant. Gemäss einer Studie des Programms Kleinwasserkraftwerke könnte diese Technologie eines Tages in über 400 Schweizer Trinkwasserkraftwerken ihre Anwendung finden. Weniger geeignet sind die kostengünstigen Maschinen für Fließgewässer, weil ihr Wirkungsgrad bei schwankendem Wasserdargebot zu niedrig ist. Dies brachte den bekannten Schweizer Kleinturbinen-Spezialisten J.-M. Chapallaz auf die Idee, rückwärtslaufende Pumpen so umzubauen, dass mit Hilfe eines Leitapparats der Durchfluss besser gesteuert werden kann. Im Projekt **Pompes fonctionnant en turbine avec réglage de débit [1]** werden in einer ersten Phase die theoretischen Berechnungsgrundlagen erarbeitet. Mit Resultaten ist im Verlauf des Jahres 2007 zu rechnen.

Die vielseitige Palette an Projekten wird durch ein grösseres neues Forschungs- und Entwicklungsprojekt des MHyLab in Montcherand (VD) abgerundet. Das MHyLab, eine als Stiftung organisierte Dienstleisterin für Kleinturbinentechnologie, hat in den vergangenen Jahren bereits erfolgreich Pelton- und Axialturbinen in vereinfachter Bauweise für Kleinwasserkraftwerke entwickelt (Figur 2). Diese Turbinendesigns sind heute auf dem Markt erhältlich. Im mittleren Fallhöhenbereich um die 50m sind jedoch weder Pelton- noch Axialturbinen die Lösung der Wahl; um auch diesen Bereich abdecken zu können, hat sich MHyLab zum Ziel gesetzt, eine Diagonalturbine zu entwickeln. Es wird eine Konstruktion angestrebt, die den Axialturbinen nicht unähnlich ist. Das Projekt **Turbines diagonales [3]** ist im Jahr 2006 angelaufen und dauert mindestens bis 2008. Neben dem Programm Kleinwasserkraftwerke beteiligen sich die Industriellen Betriebe Genf sowie voraussichtlich weitere Elektrizitätsunternehmen an der Finanzierung.



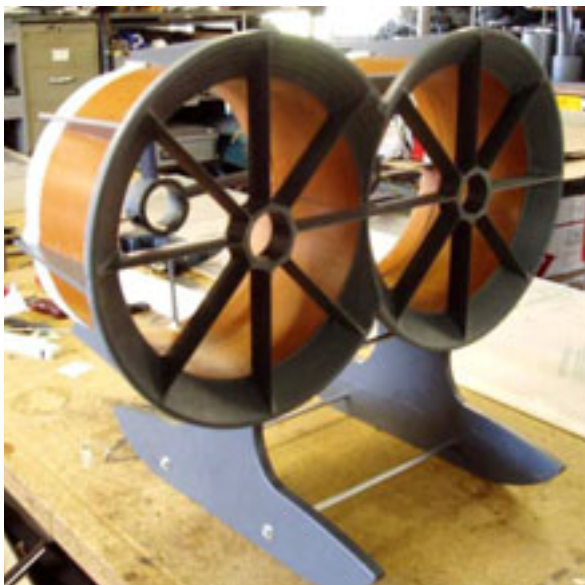
Figur 2: Niederdruckturbine aus dem Hause MHyLab; auf dieser Technologie aufbauend werden gegenwärtig die neuen Diagonalturbinen entwickelt. (Bild: MHyLab).

INNOVATIONEN IM NIEDERDRUCKBEREICH

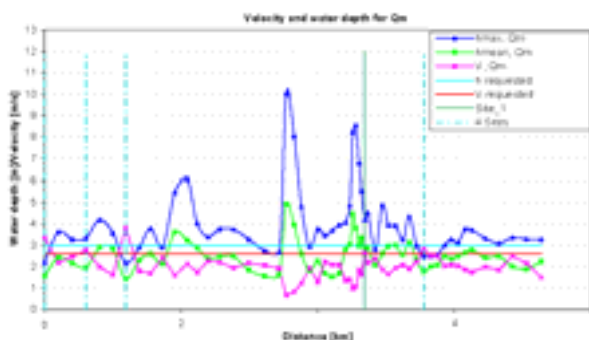
Verschiedentlich wurden Konzepte vorgeschlagen, um neben der potenziellen Energie auch die kinetische Energie in schnell fließenden Gewässern nutzen zu können. Ein relativ weit fortgeschrittener Ansatz ist eine hydrokinetische Propellerturbine der Firma UEK, die auch als «elektrischer Unterwasser-Drachen» bezeichnet wird (Figur 3). Die ETH Lausanne untersucht im Rahmen des Projekts **Floating Turbine UEK Swiss [6]**, wie sich diese Maschinen strömungstechnisch verhalten, insbesondere in Extremsituationen und bei Hochwasser. Dazu laufen gegenwärtig Modellversuche im **Laboratoire des Constructions Hydrauliques (LCH)** (Figur 4). Am Projekt beteiligen sich neben dem Programm Kleinwasserkraftwerke und privaten Investoren auch die **Services industriels de Genève (SIG)**. Aufgrund digitaler Gewässermodelle wird nach geeigneten Standorten für solche Anlagen in der Schweiz gesucht. Hydrokinetische Turbinen eignen sich zur ergänzenden Nutzung der Energie in schnell fließenden Gewässern und bieten einige Vorteile wie minimale bauliche Eingriffe und hohe Fischfreundlichkeit.

STATISTIKEN UND POTENZIALSTUDIEN

Im Hinblick auf aktuelle politische Diskussionen über das Potenzial erneuerbarer Energien wurden vom Programm Kleinwasserkraftwerke zwei Vor-



Figur 3: Modell des doppelten «Unterwasser-Drache» an der EPFL, hier noch ohne Laufrad. (Bild: Gresham SàRL / EPFL).



Figur 4: Für den Einsatz von UEK-Turbinen müssen die Wassertiefe (oberste Kurve) und die Strömungsgeschwindigkeit (unterste Kurve) genügend hoch sein. (Bild: Gresham SàRL / EPFL).

untersuchungen in Auftrag gegeben. Das Ziel ist, mittelfristig das technische (Klein-)Wasserkraftpotenzial in der Schweiz systematisch zu berechnen. Die Herausforderung besteht dabei einerseits in der grossen Zahl möglicher Standorte. Eine Untersuchung jedes einzelnen Standorts würde den Rahmen einer Potenzialstudie bei Weitem sprengen. Deshalb wurde in bisherigen Arbeiten jeweils mit einer willkürlichen Auswahl von Gebieten gearbeitet – meist solche, für welche bereits eine gute Datengrundlage bestand, was natürlich für die Repräsentativität nicht unbedingt förderlich ist. Zudem ist die Definition des «technischen Potenzials» nicht eindeutig, sondern es muss eine willkürliche Grenze zwischen «machbar» und «nicht machbar» gezogen werden.

Im Projekt **Vorabklärung Potenzial Trink- und Abwasserkraftwerke** [7] wurde vom Zürcher Büro **eam** im Auftrag des Programms Kleinwasserkraft-

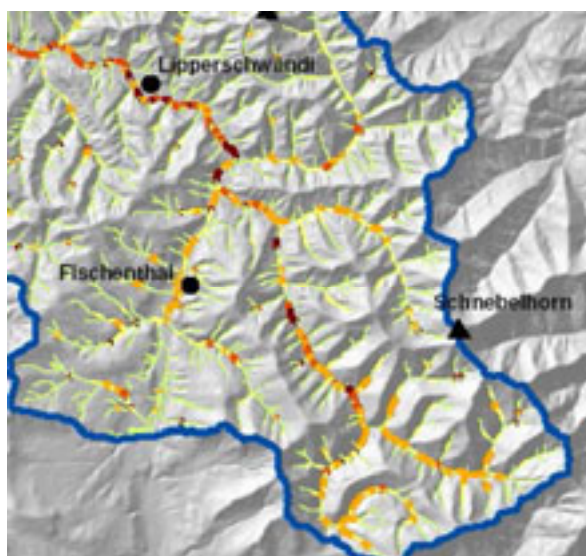
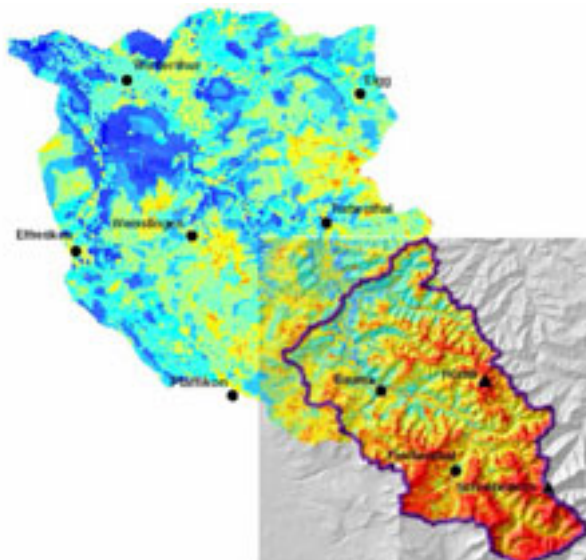
werke untersucht, mit welcher Methodik das vorhandene Trink- und Abwasserkraft-Potenzial in der Schweiz besser bestimmt werden könnte. In der Tat bilden nach wie vor die DIANE-Studien aus den 1990er-Jahren die umfassendste Grundlage, jedoch genügen sie aus verschiedenen Gründen den heutigen Anforderungen nicht mehr.

Die Studie kommt zum Schluss, dass der gangbarste Weg eine gross angelegte telefonische Befragung der Wasserversorgungen ist. Erfahrene Ingenieure können, so die Studie, schon mit relativ wenigen gezielten Fragen das mögliche Potenzial in einer Wasserversorgung abschätzen. Für die Trinkwasserkraft (ohne Abwasserkraft) wird der Aufwand auf etwa 200'000 Fr. geschätzt.

Dass in Trinkwasserversorgungen noch ein grosses Potenzial brachliegt, ist allgemein erkannt. Noch grösser ist das ungenutzte Potenzial in den Fliessgewässern. In der Elektrizitätswirtschaft und bei den grossen Lieferanten galten bis vor kurzer Zeit Anlagen unter 10 MW als wenig attraktiv, solche unter 1 MW gar als kaum machbar. Inzwischen hat ein grundlegendes Umdenken begonnen. Denn im Licht der Stromverknappung und im Vergleich mit anderen erneuerbaren Energien handelt es sich um ein sehr beachtliches Potenzial.

Potenzialberechnungen für die Schweizer Fliessgewässer sind aufwändig – schlicht deshalb, weil es hierzulande über 60'000 km Gewässer gibt. Systematische, detaillierte Untersuchungen des Kleinwasserkraft-Potenzials wurden bisher nicht gemacht, einmal abgesehen von Studien über forcierte Nutzung zwecks Energieautonomie zur Zeit der Weltkriege. Inzwischen sind dank der rasanten Entwicklung der GIS-Systeme technische Mittel vorhanden, die weitergehende Untersuchungen ermöglichen. Die **Vorgehensabklärung Potenzial Kleinwasserkraft** [5], erstellt von **econcept** und vom **Geographischen Institut der Universität Bern**, lotet diese Möglichkeiten aus und vergleicht sie mit einer klassischen Potenzialberechnung aufgrund von Wasserrechtsregistern und Sanierungsberichten der kantonalen Behörden. Modellhaft wurde das Gebiet der Töss berechnet, und zwar mit einem digitalen Gewässernetzmodell mit einer Auflösung von 100 m, also einem sehr feinen Modell (Figur 5). Demnach beträgt das theoretische Grenzpotenzial der Töss 27 MW. Davon entfallen 0.47 MW auf Standorte, die früher bereits genutzt wurden und heute stillgelegt sind.

Natürlich ist eine vollständige Nutzung weder ökologisch vertretbar noch wünschenswert. Wichtig ist aber in jedem Fall die Kenntnis des Potenzials in qualitativer und quantitativer Hinsicht. Die Nachfrage nach soliden Zahlen seitens der Politik ist gerade in den letzten Jahren enorm gestiegen. Zur Fortsetzung der Arbeit müssen Finanzierungsquellen gefunden werden. Die Suche ist angelaufen.



Figur 5: Digitales Geländemodell (oben) und, als Ergebnis der numerischen Potenzialberechnung, die Energiedichte der einzelnen Gewässerabschnitte im oberen Einzugsgebiet der Töss – je dunkler, desto höher das Potenzial. (Bilder: Uni Bern).

WEITERE PROJEKTE

In den letzten Jahrzehnten konnten bei realisierten Anlagen viele konkrete Erfahrungen mit KWKW gesammelt werden. In einigen Fällen haben sich

dabei Qualitätsmängel gezeigt. Typischerweise erhöhen Qualitätsmängel die Gesteungskosten pro kWh merklich gegenüber der Planung.

Im Vorprojekt *Optimierung von Kleinwasserkraftwerken durch Qualitätssicherung* [4] wurde erstmals genauer untersucht, welche Qualitätsmängel bei Kleinwasserkraftwerken auftreten und wie Fehlern vorgebeugt werden kann. Dazu wurden neun Fachleute aus der Schweiz in Interviews befragt. Es zeigte sich, dass den Planungsprozessen eine zentrale Rolle zukommt. Die engen Budgets kleiner Anlagen wirken für die Qualitätssicherung erschwerend und es ist viel Erfahrung nötig, um trotzdem am richtigen Ort die nötige Qualität zu erreichen. Ein Erfahrungsaustausch ist also im Interesse aller Beteiligten. Die HTA Luzern als federführende Institution will durch entsprechende Guidelines zu diesem Austausch beitragen.

Im Rahmen dieses Projekts wurden auch konkrete Fallstudien durchgeführt. Die Hochschule Rapperswil untersuchte einen Schadenfall mit einer gebrochenen Druckrohrklappe eines österreichischen Herstellers (Figur 6). Auch Turbinenwirkungsgrade sorgen häufig für Gesprächsstoff. Für den Fall des *Kraftwerks Freienstein (ZH)* führte die HTA Luzern eine Überprüfung des vom Hersteller garantierten Maschinenwirkungsgrades durch; zudem wurde in Zusammenarbeit mit dem *Institut für Strömungsmechanik und hydraulische Strömungsmaschinen der Universität Stuttgart* eine Modellierung der Strömungsverhältnisse in der Turbine durchgeführt.



Figur 6: Qualität sichern ist besser als Heilen: Gebrochener Stift einer nicht normkonformen Druckrohrklappe. (Bild: Entec).

Nationale Zusammenarbeit

Mit dem aktuellen Projektportfolio ist es gelungen, die vorhandenen Wissensträger im Bereich Kleinwasserkraft fast vollständig in das Forschungsprogramm einzubeziehen. Dazu gehören neben privaten Organisationen wie der Stiftung Revita, MHyLab und spezialisierten Ingenieurbüros die Fachhochschulen Genf, Sion, Luzern, Rapperswil, Burgdorf, die Universität Bern, sowie aus dem

ETH-Bereich die ETH Lausanne über ihre Mitarbeit an den hydrokinetischen Turbinen.

Traditionellerweise finanziert das BFE eher Projekte privater Firmen / Organisationen oder angewandte Forschung im FH-Bereich, während im ETH-Bereich meist umfangreichere Projekte durch den ETH-Rat, die KTI oder den Nationalfonds unterstützt werden. Bei grösseren Vorha-

ben sind dem Programm Kleinwasserkraftwerke finanzielle Grenzen gesetzt; daher werden meist eher kleinere Vorhaben im Bereich der marktnahen Forschung unterstützt. Das Programm Kleinwasserkraftwerke deckt dabei einen wich-

tigen Nischenbereich ab mit Fragestellungen, der weder von der Privatindustrie noch von der Forschung in der Grosswasserkraft bearbeitet werden. Die aktuellen Projekte bieten dafür einige gute Beispiele.

Internationale Zusammenarbeit

Durch das Pilotprojekt für hydrokinetische Turbinen in der Rhone ist es gelungen, ein neues internationales Projekt in der Schweiz anzusiedeln. Der externe Projektpartner schrieb dazu: «Switzerland being environmentally conscious, having hydropower expertise and an economically interesting renewable energy tariffs, provides an excellent choice for initial project testing and development.»

Die sehr gute Verfügbarkeit öffentlicher hydrologischer Daten in der Schweiz und über die Rhone im Besonderen war ebenfalls ausschlaggebend für das Projekt.

Dies bestätigt, dass die Wasserkraft-Hochburg Schweiz auch als Forschungsstandort attraktiv ist, sofern sie denn gewillt ist, diese Stärken zu nutzen. Das sollte als klares Signal zu Händen der Finanzgeber gewertet werden.

Die Europäische Kommission finanzierte im Rahmen des Programms *Intelligent Energy for Eu-*

rope / ALTENER das Projekt **SPLASH – Spatial Plans and Local Arrangements for Small Hydro** [8], [17]. Der Schweizer Beitrag bestand hierbei in der Bereitstellung von Know How im Bezug auf Kleinwasserkraftprojekte an Standorten, welche bisher als technisch unattraktiv galten. Das BFE finanzierte zu diesem Zweck die Digitalisierung und teilweise Aufarbeitung der DIANE- und PACER-Publikationen, von denen sich in der Schweiz etliche Bände quasi als Standardwerk etabliert haben. Einige der DIANE-Bände erlauben jetzt dank Digitalisierung auch elektronische Volltextsuche. Alle Publikationen können neu auf der Website des Programms Kleinwasserkraftwerke (www.kleinwasserkraft.ch [18]) heruntergeladen werden. Zudem wurde mit dem Handbuch Kleinwasserkraftwerke 2006 eine aktuelle Übersicht zu Projektablauf, Förderung, Rechte und Pflichten, Vergütungen und Geldfragen erstellt.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Wie eingangs erwähnt, handelt es sich bei den Pilot- und Demonstrationsprojekten um solche, die in früheren Jahren gestartet wurden. Bei der Realisierung konkreter Anlagen handelt es sich zumeist um langfristige Vorhaben. Regelmässig darf konstatiert werden, dass diese Projekte bei ihrem erfolgreichen Abschluss eine ungleich höhere öffentliche Beachtung finden als reine Forschungsprojekte. Auch in Fachkreisen sorgen diese Projekte jeweils für breites Interesse. Denn letztlich ist für die Markteinführung einer Innovation ein P&D-Projekt häufig die alles entscheidende Etappe.

Für die **Wasserkraftschnecke am Grüttbach in Derendingen** [9] wurden die Betriebserfahrungen über ein Jahr ausgewertet. Die Wasserkraftschnecke in Derendingen ist die erste ihrer Art in der Schweiz. Die Technologie ist einfach und robust, und für kleine Fallhöhen und geringe Leistungen eine sehr gute Wahl. Ausserdem handelt es sich um eine sehr fischfreundliche Technologie (Figur 7).

In der letzten Projektphase, der Auswertung der Betriebserfahrungen, wurden betriebliche wie auch konstruktive Aspekte beleuchtet. Somit sind die Erfahrungen durch die Unterstützung

des Programms Kleinwasserkraftwerke direkt für Folgeprojekte verwendbar. Beispielsweise muss der Problematik des schwankenden Unterwasserpegels Beachtung geschenkt werden; stimmt dieser nicht mit dem Füllstand der sich abwärts bewegenden Wendel überein, so ist mit erhöhter Geräuscentwicklung zu rechnen. Der Frostresistenz wurden weitere Untersuchungen gewidmet. Von Natur aus ist sie relativ gut; in Extremsitua-



Figur 7: Wasserkraftschnecke mit dazugehörigem Gebäude. (Bild: T. Köhli).

tionen kann mit zusätzlichen Massnahmen wie Bespritzen mit Wasser Abhilfe geschaffen werden. Der Anfall von Schwemmgut, die parallele Fischtreppe sowie der Wartungsaufwand wurden ebenfalls untersucht. Die vorgesehene, aber noch aufgeschobene Installation eines Rechenreinigers scheint gerechtfertigt und dürfte den Wartungsaufwand senken helfen. Insgesamt fällt die Bilanz nach dem ersten Betriebsjahr positiv aus.

An der Berner Fachhochschule Burgdorf wurde zudem ein detaillierter technischer Bericht zur Anlage inklusive Wirkungsgradüberprüfung erstellt.

Potenzial für Wasserkraftschnecken gibt es in vielen Fällen an Standorten mit alten Wasserrechten aus ehemaligen Gewerbebetrieben; es handelt sich um viele Standorte (einige Hundert bis max. 2000 in der Schweiz), mit Leistungen typischerweise unter 20 kW. Darüber hinaus kann die Wasserkraftschnecke auch für sehr niedrige, bisher ungenutzte Fallhöhen eingesetzt werden. So beträgt etwa die Fallhöhe der Testanlage ganze 1.15 m.

Das **Kleinwasserkraftwerk Buchholz [10]** wurde im Jahr 2006 etwas verspätet, aber erfolgreich fertiggestellt (Figur 8). Anlässlich der Einweihungsfeier vom 28.10.2006 hatten Trägerschaft und Öffentlichkeit die Gelegenheit, das neue Kraftwerk zu besichtigen (Figur 9). Diese Gelegenheit wurde rege genutzt. Auch das darauf folgende Presseecho hat die Erwartungen übertroffen.

Die Anlage leistet 140 kW und ist mit zwei einfachregulierten Propellerturbinen ausgestattet. Weil der Stauraum ein Auenschutzgebiet von nationaler Bedeutung ist, musste besonders umsichtig geplant und gebaut werden. In die beachtliche Staumauer unsichtbar integriert ist nicht nur das Kraftwerk, sondern auch die erste Fischtreppe der Schweiz, die nach über 100 Jahren erstmals wieder die Durchgängigkeit der Glatt herstellt.

Noch vor wenigen Jahren wäre ein Projekt wie Buchholz als Utopie abgestempelt worden. Durch den Umstand, dass die bestehende Mauer ohnehin saniert werden musste, waren die Gemeinden Gossau und Flawil aber bereit, die dafür vorgesehenen Mittel in das neue Kraftwerk zu investieren. Diesem Umstand sowie dem Beitrag des Programms Kleinwasserkraftwerke ist es zu verdanken, dass private Investitionen von rund 1 Mio. Fr ausgelöst werden konnten. Die Erforder-

nisse des Umweltschutzes wurden von Anfang an ernst genommen, der Dialog mit den Umweltverbänden gesucht. Somit konnte die Anlage mit Unterstützung sämtlicher Partner realisiert werden. Während solche Projekte heute noch zäh um ihre Wirtschaftlichkeit ringen müssen, darf man nicht übersehen, dass sich die Ausgangslage gerade für Kleinwasserkraftwerke bei steigenden Strompreisen relativ rasch ändert. Ob ein solches Projekt volkswirtschaftlichen Nutzen bringt, muss sich letztlich über die gesamte Lebensdauer weisen - diese kann gerade für die kostenintensiven Betonbauten durchaus 100 Jahre erreichen, wie bestehende Anlagen beweisen.



Figur 8: Fertiggestelltes Wasserkraftwerk Buchholz. (Bild: Entegra AG).



Figur 9: Alex Arter (Entegra Wasserkraft AG) dankt dem Gossauer Stadtrat Kurt Züblin für die Zusammenarbeit. (Bild: Lautenschlager / Entegra).

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Das Forschungsprogramm Kleinwasserkraftwerke hat sich in der kurzen Zeit seines Bestehens erfolgreich etablieren können und kann heute auf ein Netzwerk verschiedener kompetenter Akteure zählen. Die Aktivitäten stehen allesamt in engem Bezug zum Forschungsprogramm 2004-2007. Besonders für die beiden wichtigsten Schwerpunkte - Optimierte Turbinen & PAT sowie Niederdruck-Innovationen - konnten verschiedene interessante Projekte initiiert und gefördert werden. Das ist angesichts der bescheidenen Grösse des Forschungsprogramms keine Selbstverständlichkeit.

Damit das Programm auch in Zukunft Erfolg haben kann, müssen heute schon die Weichen gestellt werden. Das Projektbudget für 2007 und 2008 ist bereits zu einem ansehnlichen Teil verpflichtet. Es gilt, die Aktivitäten zu priorisieren und mehrere Jahre im Voraus zu planen. Die Frage, ob ein alleiniges Kleinwasserkraft-Forschungsprogramm die Anforderungen in Zukunft noch abdecken kann, beziehungsweise wie die Schweiz als Wasserschloss Europas auch die Forschungskompetenz in der Grosswasserkraft im Land halten kann, wurde von der CORE gestellt. Entsprechende Abklärungen sind im Gang.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 vorhanden

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

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

- [1] J.-M. Chapallaz (jmceng@bluewin.ch): *Pompes fonctionnant en turbines avec réglage de débit / Pumpe als Turbine mit verstellbarem Leitapparat (PAT Francis)* (JB)
- [2] Jorge Arpe, Jean Prénat, Michel Dubas, Hans-Peter Biner (jorge.arpe@hesge.ch): *Caractéristiques des pompes fonctionnant en turbines, évaluation de modèles de pertes / Charakteristiken von Pumpen im Turbinenbetrieb, Untersuchung von Modellen zu hydraulischen Verlusten* (SB Projekt 101712)
- [3] MHyLab, info@mhyllab.com: *Turbines diagonales 06 - Programme de développement d'une turbine hydraulique diagonale destinée à équiper les petites centrales à moyenne chute (25 à 100 m)* (-)
- [4] Thomas Staubli (tstaubli@hta.fhz.ch), Hochschule für Technik und Architektur Luzern: *Optimierung von Kleinwasserkraftwerken durch Qualitätssicherung - Vorprojekt* (SB Projekt 101488)
- [5] Reto Dettli (reto.dettli@econcept.ch), econcept AG, Zürich in Zusammenarbeit mit dem geographischen Institut der Universität Bern: *Vorgehensabklärung Potenzial Kleinwasserkraft* (SB Projekt 101480)
- [6] Karl Randall (karlrando@resham.ch), Resham Sàrl, Genève: *Floating Turbine UEK Swiss Project - Feasibility Study* (JB)
- [7] Ernst A. Müller (mueeller@infrastrukturanlagen.ch), Büro eam, Zürich: *Vorabklärung Potenzial Trink- und Abwasserkraftwerke* (SB Projekt 101481)
- [8] Martin Roth (martin.roth@entec.ch), entec ag, St. Gallen: *SPLASH – Spatial Plans and Local Arrangements for Small Hydro*, Schweizer Beitrag zum EU-Forschungsprojekt (SB).

Liste der P+D-Projekte

- [9] Thomas Köhli (thomaskoehli@yahoo.com), Derendingen: *Demonstrationskraftwerk alte Ziegelei am Grützbach, Derendingen* (SB Projekt 46540)
- [10] Ivo Scherrer (info@entegra.ch), ENTEGRA Wasserkraft AG, St. Gallen: *Kleinwasserkraftanlage Buchholz* (SB Projekt 100091)

Referenzen

- [11] Manuel Buser, Hedi Feibel, entec ag, St. Gallen, Forschungsprogramm Kleinwasserkraftwerke 2004-2007, Download: <http://www.kleinwasserkraft.ch/web/deutsch/programm/forschung.html>
- [12] Manuel Buser, Martin Bölli, entec ag, St. Gallen: Programm Kleinwasserkraftwerke: Jahresplan 2006 zu Handen BFE
- [13] 4. Jahresbericht EnergieSchweiz 2005/06, UVEK, Programmleitung EnergieSchweiz, BFE (Herausgeber), Download: <http://www.energie-schweiz.ch/>
- [14] Positionspapier Energie aus Kleinwasserkraftwerken: Ziele und Prioritäten für die Nutzung von Energie aus Kleinwasserkraftwerken, BFE, Version 1.2, Dezember 2004, Download: <http://www.kleinwasserkraft.ch/web/deutsch/programm/>
- [15] Manuel Buser, Programm Kleinwasserkraftwerke c/o entec ag: *Statistische Erfassung von Kleinwasserkraftwerken in der Schweiz - Konzeptpapier zu Status und Perspektiven*, 2006, erhältlich bei der Programmleitung (<http://www.kleinwasserkraft.ch>)
- [16] ESHA, Bruxelles; EPFL-LCH, Lausanne; MHyLab, Montcherand et al: *Proposals for a European Strategy of Research, Development and Demonstration (RD&D) for Renewable Energy from Small Hydropower*, 2005, <http://www.esha.be>
- [17] SPLASH-Website, <http://www.esha.be/index.php?id=30>
- [18] Bibliothek des Programms Kleinwasserkraftwerke, <http://www.kleinwasserkraft.ch/web/deutsch/bibliothek/>

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM GEOTHERMIE

Rudolf Minder

rudolf.minder@bluewin.ch



Bohrturm des Projekts Deep Heat Mining, Basel

Der für die erste Tiefbohrung von 5000 m eingesetzte 58 m hohe Bohrturm ist der zur Zeit grösste elektrisch operierenden Land-Bohrturm in Europa. Da das Projekt infolge mehrerer induzierter Erdstösse zur Zeit sistiert ist, wurde der Bohrturm anfangs 2007 abgebaut (Bild: Geopower Basel AG).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im Bereich der **untiefen Geothermie** ist die Technik der Erdwärmesonden heute ausgereift und behauptet sich am Markt. Die Forschungsunterstützung zielt deshalb primär auf grosse und komplexe Anlagen, insbesondere für kombiniertes Heizen und Kühlen. Zu den Forschungsthemen gehören Verfahren zur Beurteilung von Anlagen wie z.B. response tests, Untersuchungen über das langfristige Verhalten von Anlagen und Komponenten, Aufarbeiten von Betriebserfahrungen sowie Erfolgskontrollen. Ebenfalls besteht noch Forschungsbedarf im Bereich der Erdwärmekörbe, welche sich besonders für Niedrigenergie-Bauten eignen.

Bei den **hydrothermalen Quellen** besteht ein Bedürfnis nach einer Bestandesaufnahme der verfügbaren Daten über Aquifere mit geothermischem Nutzungspotential, sowie nach der Identifikation möglicher Projektstandortgebiete. Tiefer gelegene Aquifere mit Temperaturen von 100°C und mehr bieten auch die Möglichkeit der geothermischen Stromerzeugung. Die Forschung

und Entwicklung sowie P+D-Anlagen in diesem Bereich haben deshalb einen hohen Stellenwert.

Bei der **tiefen Geothermie** weisen die durch Tiefbohrungen erschliessbaren Wärmereservoirs in grosser Tiefe - *Enhanced Geothermal Systems* (EGS) - ein sehr grosses Potential auf. Obwohl die Forschung sich schon länger mit diesen Systemen befasst, sind noch umfangreiche Anstrengungen nötig, um solche Anlagen zur Marktreife zu bringen. Die Gewinnung von Wärme aus einem in 5000 m Tiefe liegenden Felsvolumen ist eine enorme Herausforderung und erfordert Kenntnisse aus den verschiedensten Disziplinen. Ein fundamentales Problem dieser Technik ist es, dass der Beweis der Machbarkeit nur mit sehr aufwändigen Pilotprojekten erbracht werden kann. Wie die Ereignisse in Zusammenhang mit dem Pilotprojekt *Deep Heat Mining* in Basel gezeigt haben, besteht auf diesem Gebiet noch erheblicher Forschungsbedarf. In diesem Bereich ist auch die internationale Zusammenarbeit von sehr grosser Wichtigkeit.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

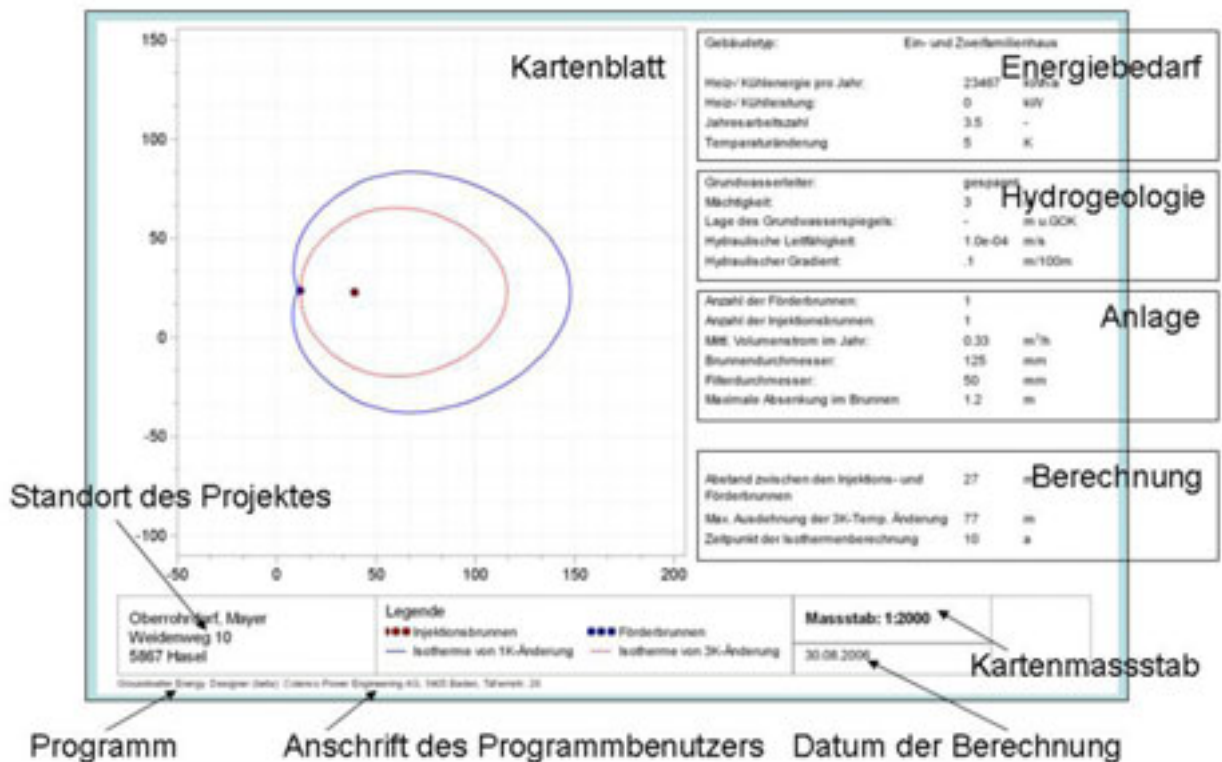
UNTIEFE GEOTHERMIE

Manuel pour le refroidissement de bâtiments par «géo-cooling» sur sondes géothermiques verticales: critères d'intégration, potentiel de refroidissement et règles simplifiées de dimensionnement [1]: Le projet de recherche *Rafrachissement par géo-cooling: 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.

Étude du potentiel d'utilisation du «géo-cooling» d'une installation avec sondes géothermiques verticales appliqué à un bâtiment administratif Minergie® à Chiasso [2]: 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 (donc avec des températures très basses pour le chauffage et très haute pour le refroidissement), il possède de bonnes caractéristiques pour une intégration optimale d'un système de chauffage et de refroidissement par un champ de sondes géothermiques.

Actualisation du mini-module de chauffage pour tests de réponse thermique des terrains [3]: Le projet vise à augmenter les performances et la rationalisation du mini-module de chauffage réalisé à l'EPFL par le *Laboratoire de mécanique des sols*. Ce module permet de déterminer les caractéristiques thermiques des sols et sondes géothermiques. Sa nouvelle version permettrait de tester des sondes géothermiques jusqu'à environ 300 m de profondeur, tout en conservant la philosophie d'un appareil compact et léger. Cependant, pour ce type de sondes, un débit plus important doit être injecté, ce qui implique de repenser le circuit hydraulique. La télétransmission des données a de plus été actualisée à la suite de problèmes rencontrés avec le réseau GSM. Ces modifications permettent de maintenir cet appareil d'essai à la pointe de la technologie.

Groundwater Energy Designer (GED). Computergestütztes Auslegungstool zur Wärme- und Kältenutzung von Grundwasser [4]: Dieses Tool richtet sich an Planer von kleineren Anlagen sowie an Bewilligungsbehörden. Es berücksichtigt standortspezifisch den Energiebedarf und die hydrogeologischen Verhältnisse. Ausgehend von einer Wärme- oder Kältebedarfsanalyse werden interaktiv die Möglichkeiten der direkten Wärmenutzung des Grundwassers geprüft. Anhand vereinfachter hydrogeologischer Charakteristiken werden dazu die Brunnen zur Grundwasserförderung dimensioniert und unter Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse (verfügbare Grundfläche



Figur 1: Groundwater Energy Designer: grafische Präsentation der Ergebnisse.

und Grundwasserströmung) die Möglichkeit zur Versickerung des genutzten Wassers am Standort geprüft. Durch Variation der Anzahl und Standorte der Brunnen lassen sich unter Berücksichtigung der konkreten Standortverhältnisse interaktiv beliebige Konfigurationen prüfen und bezüglich einer thermischen Beeinträchtigung des Grundwassers optimieren. Figur 1 zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse des *Groundwater Energy Designer*. Das Programm ist in einer ersten Version öffentlich verfügbar (download Testversion: http://www.colenco.ch/en/groundwater_protection_waste/ged_order.html).

Erstellung von Richtlinien für Grundwasser-Wärme- und Kältenutzungsanlagen [5]: Bei der Planung und Realisierung von Grundwasser-Wärme- und -Kältenutzungsanlagen kommt einerseits der genauen Abklärung der vorliegenden geologisch-hydrogeologischen Voraussetzungen und andererseits den auf die jeweiligen Voraussetzungen abgestimmten Massnahmen wesentliche Bedeutung zu. Im vorliegenden Handbuch werden die einzelnen aufeinander folgenden Vorgehensschritte wie z.B. Konsultation schon vorhandener Unterlagen, richtige Platzierung der zu realisierenden Bohrung sowie die in der jeweiligen Bohrung durchzuführenden Tests aufgeführt. Die aus diesen Vorabklärungen jeweils resultierenden Massnahmen wie z.B. Realisierung eines rückspülbaren Filters in Folge ständig anfallenden Sandes werden anschliessend aufgeführt und erläutert. Mit diesem Vorgehens- und Massnahmenkonzept lässt sich unter Berücksichtigung der

jeweiligen Voraussetzungen die optimalste Ausgangslage für die erfolgreiche Realisierung einer Grundwasser-Wärme- und/oder -Kältenutzungsanlage bewerkstelligen.

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 [6]: Das Projekt dient zur Qualitätskontrolle von *in-situ* Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen mittels der vom BFE geförderten und erst jüngst patentierten kabellosen Sonde (*Fisch*). Diese soll zukünftig bei der Dimensionierung von grossen geothermischen Anlagen eingesetzt werden. Konkret soll das Temperaturfeld im Untergrund mit 24 Erdwärmesonden gemessen werden. Aus den Daten wird ein detailliertes Temperatur-Tiefenprofil erwartet, welches die Temperaturverhältnisse im Untergrund widerspiegelt. Zur Berechnung bzw. Eichung von Daten des geothermischen Wärmeflusses sind des Weiteren verlässliche Labormessungen der Wärmeleitfähigkeit und der Gesteinsdichte bzw. der Porosität notwendig.

Erfahrungsbericht Heizen/Kühlen mit Erdwärmekörben [7]: Erdwärmekörbe werden immer häufiger eingesetzt, insbesondere auch für Niedrigenergie-Bauten. Für die Auslegung sind lokale Verhältnisse und die Art der Energienutzung wesentliche Faktoren. Anhand von Beispielen wird aufgezeigt, welche Auswirkung Überlastungen und schlechte Böden haben können. Das beste-

hende Handbuch [25] wird durch eine Checkliste ergänzt, die helfen soll, Schäden zu vermeiden. Um die Betriebsweise besser verstehen zu können, werden eine EFH-Anlage (Erdwärmekörbe-WP Heizen und Kühlen), 2 sanierte Anlagen und eine MFH-Anlage mit *Datalogger* versehen (Korbertemperatur, WP ein/aus, Heizsystem) und während 1.5 Jahren ausgemessen und ausgewertet.

Update «SwEWS» Software zur Auslegung von Erdwärmesonden-Anlagen [8]: Bekanntlich werden Erdwärmesonden (EWS) in immer grössere Tiefen installiert, d.h. grossteils in Molasseformationen im Schweizer Mittelland. Da es hierbei in erster Linie um Grossanlagen handelt, kommt bei der Auslegung derartiger Anlagen eine genaue Kenntnis der thermischen Leitfähigkeit grosse Bedeutung zu. Die 1998 publizierte Software/Datenbank *SwEWS* wurde daher mit neuen Daten aus Tiefbohrungen der letzten 7 Jahre ergänzt. Das Programm wurde auf *ACCESS 2000* umprogrammiert und die Benutzeroberfläche von den Daten getrennt, damit spätere *updates* benutzerfreundlich gestaltet werden können. Das PC-Programm wurde im Berichtsjahr fertiggestellt und ist für Anwender verfügbar.

Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden [9]: Erdwärmesondenanlagen sind ein etabliertes System zum Heizen und Kühlen von Gebäuden. Solche Anlagen benötigen eine fachgerechte Dimensionierung und Bauausführung. Eine nicht sachgerechte Vorgehensweise führt in aller Regel zu einem Schadensfall. Die in diesem Projekt untersuchten Schadensfälle haben u.a. die folgenden Ursachen: Erhöhung oder fehlerhafte Bestimmung des Wärmebedarfs, fehlerhafte thermische Werte des Untergrundes, Unterdimensionierung der EWS, schlechte oder fehlende Hinterfüllung der EWS, fehlerhafte Hydraulik oder Regelung der Wärmepumpe, Leckagen. Insbesondere bei zu hohem Wärmeentzug aus der Erdwärmesonde kommt es in der Regel zu Gefriererscheinungen um die Erdwärmesonde und die Leistung der Anlage verschlechtert sich zusehends bis im Extremfall zum vollständigen Versagen. In diesem Projekt werden Beispiele für häufige Schadensursachen und die dabei nötigen Korrekturmassnahmen erläutert. Für einige Fälle wird zudem die Ursache durch den Vergleich mit Simulationsrechnungen illustriert. Abschliessend werden Hinweise zur fachgerechten Planung und Bauausführung von Erdwärmesondenanlagen gegeben.

TUNNELWASSERNUTZUNG

Concept de drainage des tunnels en vue d'une optimisation de l'utilisation géothermique [10]: A l'heure actuelle l'utilisation du potentiel thermique des eaux drainées par les tunnels se limite à les capter au droit des portails et de

les conduire vers des points d'utilisation plus ou moins éloignés. Cette manière de faire peut être suffisante dans les cas où le potentiel d'utilisation est manifestement réduit. Le rendement thermique des eaux souterraines des tunnels est susceptible d'être amélioré de différentes façons, p. ex.: (1) réduction des pertes de température le long du tunnel; (2) optimisation des débits d'eau disponibles par activation au moyen de forages complémentaires; (3) drainage séparatif: captage et évacuation des eaux souterraines de températures différentes dans des conduites distinctes. Après un rappel de l'état actuel de développement et des exigences techniques et environnementales, le rapport passe en revue les différents modes d'optimisation du rendement thermique et présente de nouvelles techniques de récupération de la chaleur souterraine. Des propositions d'actions pour la mise en œuvre des améliorations sont présentées dans les conclusions.

TIEFE GEOTHERMIE

Géothermie du cristallin profond de la vallée du Rhône (phase A) [11]: Le projet entend évaluer la faisabilité d'une production d'électricité d'origine géothermique, en exploitant les aquifères cristallins profonds de la vallée du Rhône dans les cantons du Valais et de Vaud. Plus précisément, le territoire à investiguer concerne les tronçons suivants: St-Maurice/Lavey - Saillon et Leuk - Brig/Naters. Les évaluations existantes montrent que le sous-sol de la vallée du Rhône en Valais et dans le canton de Vaud est caractérisé par un flux de chaleur anormal et localement par une bonne fissuration des roches. La preuve en sont les nombreux établissements de bains thermaux qui jalonnent le territoire en question. Le chimisme des eaux thermales de Lavey-Les-Bains (VD), tout comme celui des eaux de Brigerbad, montrent que le fluide thermal profond atteindrait une température de 110°C. La figure 2 présente un schéma de centrale géothermique avec valorisation des rejets thermiques. La phase A du projet a été terminée, il est prévu de commencer la phase suivante en 2007.

Base de données des fluides géothermiques de la Suisse [12]: En Suisse, de nombreuses données existent sur les eaux souterraines profondes: ces données proviennent des forages plus ou moins profonds réalisés pour l'évaluation géologique des grands ouvrages de génie civil, pour la prospection géothermique, l'exploration pétrolière, les forages de la NAGRA et ceux des centres thermaux, des sources thermales ainsi que des systèmes de drainage des tunnels. Toutes ces données sont contenues dans une multitude de rapports, souvent non publiés et dispersés. L'objectif de ce projet est de rassembler le

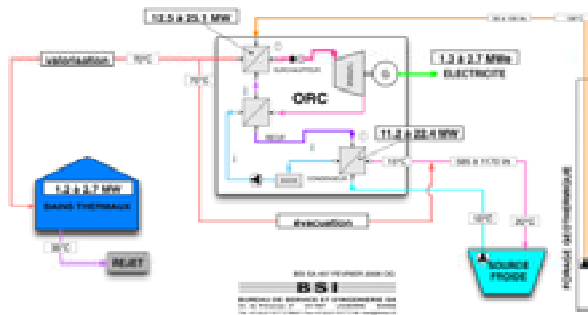


Figure 2: Schéma de centrale géothermique avec valorisation des rejets thermiques.

maximum d'informations sur les fluides profonds et de les intégrer dans une base de données relationnelles, indispensable pour la planification de nouveaux projets de géothermie. Les paramètres sélectionnés proviendront des domaines suivants: géographie, géologie, hydrogéologie, hydraulique, hydrochimie et géothermie. Géographiquement, l'ensemble de la Suisse sera couvert, sachant que la répartition des données est très peu homogène. Géologiquement, chaque formation contenant des eaux souterraines profondes, depuis le socle cristallin jusqu'aux sédiments molassiques, sera prise en considération.

Géothermie de grande profondeur (GGP) à Genève: Etude économique et business plan préliminaire [13]: Ausgehend von früher im Rahmen der allgemeinen *Deep Heat Mining* (DHM)-Studien sowie des Projekts DHM Basel erarbeiteten Unterlagen wurde ein Business-Plan für das Projekt GGP in Genf erarbeitet. Neben einer Zusammenstellung und Aufdatierung der Projektdaten wurden dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen, zusammen mit der technischen Risikoanalyse erlauben es, das Projekt GGP bezüglich der wirtschaftlichen Aspekte und Risiken zu beurteilen. Der Business-Plan soll für die privaten und öffentlichen Projektpartner eine Entscheidungsgrundlage für die nächsten Projektphasen bilden. Auf Grund der seismischen Ereignisse des Projekts DHM Basel ist das Projekt GGP Genf ebenfalls sistiert, bis die Ergebnisse der diesbezüglichen Basler Untersuchungen vorliegen.

Wissenschaftlicher Beirat für Deep Heat Mining in Basel [14]: Die mehrjährigen Forschungsaktivitäten im Bereich EGS waren eine wesentliche Basis für die Inangriffnahme des Pilotprojekts *Deep-Heat-Mining* in Basel bei dem mit der ersten Tiefbohrung im Frühjahr 2006 begonnen wurde. Angesichts der Bedeutung dieses Projektes für die Energieforschung sowie wegen der erheblichen finanziellen und technischen Risiken unterstützt während der gesamten Projektdauer ein wissenschaftlicher Beirat die Projektleitung.

Nach erfolgreicher Abteufung bis auf 5000 m wurde am 2. Dezember 2006 mit der Stimulation durch Einpressen von Wasser mit hohem Druck begonnen um Klüfte zu öffnen und wasserdurchlässig zu machen. Die Stimulationsarbeiten wurden nach einem induzierten seismischen Ereignis der Magnitude 3.4 am 8. Dezember unterbrochen. Seitdem sind drei weitere seismische Ereignisse mit Magnitude grösser als 3 aufgetreten [23]. Zur Zeit werden Methoden geprüft, wie das Reservoir besser entwickelt werden kann. Das Projekt ist bis auf weiteres sistiert und die zweite Tiefbohrung wird vorerst nicht in Angriff genommen. Der wissenschaftliche Beirat diskutierte den Ablauf und die Resultate der Stimulation am 18. Dezember 2006. Abschliessende Folgerungen bedürfen einer intensiven Auswertung der Daten und liegen derzeit noch nicht vor [22].

Geothermische Ressourcen, Erarbeitung und Bewertung des geothermischen Potentials der Schweiz, Phase 2006 [15]: Les travaux effectués durant la période du 01.01.2006 au 15.10.2006 afin d'évaluer le potentiel géothermique de la Suisse sont exposés dans ce rapport. La Suisse alémanique a fait l'objet de précédents rapports en 2004 et 2005. Le travail présenté concerne ici presque exclusivement le plateau suisse occidental. La zone étudiée est présentée, et fait l'objet d'une étude géologique et hydrogéologique avancée. Les zones de failles susceptibles d'influencer les régimes hydrauliques et thermiques régionaux sont détaillées. Figure 3 présente des résultats du calcul de la température en 3D des modèles diffusifs. Les modèles structuraux permettant le calcul des températures sont définis et exposés. Une simulation numérique basée sur des processus uniquement diffusifs est réalisée pour chaque modèle régional. Une comparaison des résultats en température ainsi obtenus avec les données thermiques disponibles dans chaque domaine défini est effectuée. Pour terminer, les températures calculées sont présentées en 3D et à la base du mésozoïque. La prochaine étape de travail concerne

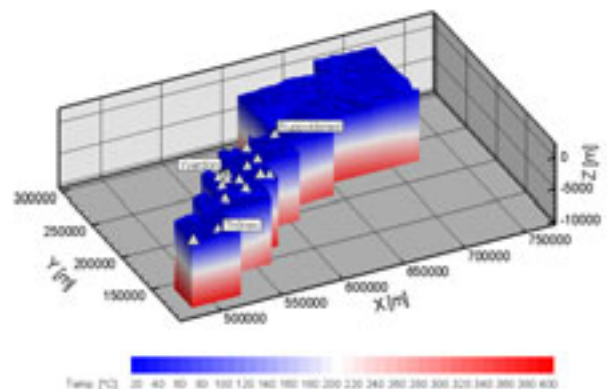


Figure 3: Résultats du calcul de la température en 3D des modèles diffusifs de Genève, WS1 à WS4, Soleure, Bâle, NOS I à NOS III, et AG_ZH.

l'évaluation de la productivité géothermique des unités lithologiques concernées. Cette évaluation sera basée sur l'analyse des données hydrogéologiques effectuées dans le présent rapport. Le projet sera terminé en 2007.

Energieumwandlungsprozesse für die Nutzung geothermischer Energie [16]: Die Studie befasst sich mit den theoretischen und praktischen Aspekten der Umwandlung von geothermischer Wärme in Elektrizität. Der Bericht umfasst drei Teile. Zunächst werden die Eigenschaften von geothermischen Ressourcen als Wärmequellen diskutiert, wobei sowohl Aquifere höherer Temperatur als auch EGS-Systeme betrachtet werden. Es wird ein Überblick über die wichtigsten physikalischen Umwandlungsprozesse gegeben und sie werden hinsichtlich ihrer zukünftigen Anwendung in geothermischen Systemen beurteilt. Der zweite Teilbericht behandelt die praxisorientierten Probleme in Zusammenhang mit Planung, Bau und Betrieb von geothermischen Kraftwerken.

Dies umfasst die technischen Grundlagen, insbesondere standortspezifische Bedingungen, Tiefbohrtechnik, Qualität des geothermischen Wassers sowie Materialwahl für die Komponenten der Installation. Weiter werden die Planung der unter- und oberirdischen Installationen, Aspekte von Betrieb und Unterhalt und Fragen zu Kosten und Wirtschaftlichkeit behandelt. Der dritte Teilbericht befasst sich mit der Methodik der optimalen Nutzung des thermodynamischen Potentials geothermischer Quellen. Dabei wurden Daten von drei Schweizer Projekten für Fallstudien verwendet: die EGS-Projekte DHM Basel und GGP Genf sowie das Aquifer-Projekt Lavey-les-bains. Als Umwandlungssysteme wurden Flash-, Rankine-(ORC-) und Kalina-Prozesse bearbeitet. Die Optimierung erfolgte mittels einer thermodynamisch-ökonomischen Zielfunktion. Die Resultate der drei Fallstudien bilden eine wertvolle Grundlage für die Weiterverfolgung der genannten Projekte sowie auch für neue Vorhaben.

Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr wurde mit den folgenden Schweizer Institutionen eng zusammengearbeitet:

- **Universitäten und Fachhochschulen:** ETHZ (Institut für 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), Naturhistorisches Museum Basel, Scuola universitaria della Svizzera italiana SUPSI (Istituto di scienze della terra e laboratorio di energia, ecologia ed economia), Haute école valaisanne, und Hochschule für Technik und Informatik (HTI) Burgdorf.

- **Stromindustrie und Wärmeversorgung:** BKW, ATEL, Elektra Baselland, Industrielle Werke Basel, Geopower Basel AG, Services Industriels de Genève, Verband Fernwärme Schweiz (VFS), etc.
- **Bundesämter, Agenturen und Fachverbände:** Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz (AEE, APES), Aktion für vernünftige Energiepolitik Schweiz (AVES), BAFU, BBW, BWG, Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS), energie-cluster, etc.
- **Energiefachstellen der Kantone**

Internationale Zusammenarbeit

Geothermal Implementing Agreement (GIA) der IEA [17]: Prof. Dr. L. Rybach ist weiterhin Vice Chairman des GIA Executive Committee. Das 14. Meeting des GIA ExCo fand am 16./17. März 2006 in Paris statt, das 15. Meeting am 7./8. September 2006 in San Diego, California, USA. Das *Geothermal Implementing Agreement* wurde um eine weitere 5-Jahresperiode bis zum 31. 3. 2012 verlängert.

FP6 Strep EGS Pilot Plant. European Geothermal Project for the Construction of a Scientific Pilot Plant based on enhanced Geothermal System, Soultz-sous-Forêts, Alsace, France [18]: Seit 2004 wird dieses EU-Projekt gemeinsam vom BFE und BBW finanziert. Die laufende Projektphase sollte ursprünglich im Frühjahr 2007 abge-

schlossen werden, das Projekt wird jedoch wegen verschiedener Zusatzarbeiten und unvorhergesehenen Problemen um 18 Monate verlängert.

Im Berichtsjahr fanden ebenso Kontakte mit verschiedenen internationalen Institutionen statt, u.a. mit **ENGINE** («Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe»), **I-GET** («Integrated Geophysical Exploration Technologies»), **EGEC** («European Geothermal Energy Council»), **IGA** («International Geothermal Association»), **BRGM** («Bureau de Recherches Géologiques et Minières»), **AMETER** (Aménagement du Territoire, Planification Énergétique et Promotion des Energies Renouvelables), **GTV** (Geothermische Vereinigung e.V. - Bundesverband Geothermie, Deutschland).

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS-Feld Hotel Dolder Zürich [19]: 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. Von Anbeginn der Planung war das Energieziel klar: halbiertes Verbrauch bei verdoppelter Grösse des Hotels. Die Bohr- und Installationsarbeiten für die Erdwärmesonden wurden im Frühjahr 2005 abgeschlossen. Das geothermische Verhalten konnte mit dem so genannten *Response Test* untersucht werden, um damit die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes zu bestimmen. Nach Bauabschluss soll im Jahr 2007 der Heiz- bzw. Kühlbetrieb mit geothermischer Energie aufgenommen werden. Entlang einer Reihe von 3 Erdwärmesonden, d.h. am Rand des EWS-Feldes und den dazugehörigen Anschlussleitungen, wurde ausserdem ein Glasfaserkabel installiert, welches für zukünftige Messungen der Betriebssoltemperatur dienen wird. Zusätzlich wurden 2 EWS in der Mitte des EWS-Feldes mit Temperaturfühlern ausgerüstet.

Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen [20]: Le *Dock Midfield* est le nouveau terminal E de l'aéroport de Zurich. Avec une longueur de 500 m sur une largeur de 30 m, il a été construit dans le cadre de la 5^e étape de

développement de l'aéroport. En raison de mauvaises conditions géologiques, le bâtiment a dû être construit sur 440 pieux de fondation. Les pieux sont de gros diamètres (de 90 à 150 cm) et sont fichés dans une couche de moraine de fond située à environ 30 mètres de profondeur. Dans le but de contribuer au chauffage et au refroidissement du bâtiment, plus de 300 pieux sont utilisés en pieux énergétiques. Le bâtiment a été mis en service en automne 2003. Les mesures de l'installation utilisant les pieux énergétiques ont débuté en octobre 2004 pour une durée de 2 ans. Des problèmes avec l'acquisition des mesures réalisées par le système de contrôle du bâtiment ont impliqué un surcroît d'efforts pour leur traitement. Toutes les mesures ont été contrôlées et analysées pour la première année de mesure, soit d'octobre 2004 à septembre 2005. Le bilan énergétique des pieux montre que 39% de l'énergie annuelle extraite est réinjectée par *geocooling*. Cette valeur est compatible avec et conforme aux prédictions établies lors de la phase de planification du système. Un potentiel d'amélioration existe dans la distribution de froid: la température de retour de l'eau dans le circuit de distribution est de 4 à 5 K plus basse que prévue dans le concept du système, ce qui pénalise l'énergie de refroidissement couverte par *geocooling*.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Der grosse Markterfolg bei den **Erdwärmesonden-Anlagen** (EWS) zeigt, dass sich die Forschung in diesem Bereich in den vergangenen Jahren gelohnt hat. Die technisch-wissenschaftlichen Hintergründe der EWS sind heute gut bekannt. Damit hat sich der Forschungsbedarf in Richtung speziellere Anwendungen wie Anlagen für Heizung und Kühlung, Geostrukturen oder Erdwärmekörbe verschoben, wo noch wichtige Erkenntnisse zu erarbeiten sind. Nach wie vor wichtig, sind auch Instrumente zur Unterstützung der Planung, Ausbildung und Qualitätssicherung. In diesen Bereichen wurden im Berichtsjahr einige wichtige Projekte durchgeführt.

Bei den **hydrothermalen Ressourcen** liegt die Umsetzung gegenüber den EWS noch deutlich zurück. Hier besteht ein grosser Bedarf an der Erarbeitung von Grundlagenkenntnissen, insbesondere bei tiefer liegenden Ressourcen. Verschiedene Projekte befassen sich mit diesen Aspekten mit dem Ziel, dass das Potential dieser Quellen längerfristig besser ausgeschöpft werden kann. Wichtige Ziele für die kommenden Jahre sind die Planung und Realisierung einer ersten Pilotanlage mit kombinierter Strom- und Wärmeerzeugung, sowie die Evaluation neuer Standortgebiete.

Die Arbeiten auf dem Gebiet der **tiefen Geothermie**, der *Enhanced Geothermal Systems* (EGS) zeigten, dass auf diesem Gebiet noch viele offene Fragen bestehen, welche die Forschung auch längerfristig beschäftigen werden. Der für 2007 geplante Abschluss des Europäischen Projekts *EGS Pilot Plant* in Soultz musste deshalb auch hinausgeschoben werden. Die im Dezember 2006 bei der Stimulation der ersten Tiefbohrung in Basel aufgetretenen seismischen Ereignisse [21-23] stellen die Fortsetzung des Projekts *Deep Heat Mining* in Frage. Für die Zukunft dieser Technik ist die wissenschaftliche Aufarbeitung dieser Ereignisse von zentraler Bedeutung. Im Rahmen der Möglichkeiten des Geothermie-Forschungsprogramms sollen diese Arbeiten im Jahr 2007 unterstützt werden. Längerfristig muss die EGS-Technik nach wie vor als interessante Option der CO₂-freien Stromerzeugung betrachtet werden, insbesondere wenn es gelingt, Reservoir mit höheren Temperaturen zu erschliessen, wie kürzlich vorgeschlagen wurde [24]. Da in diesem Bereich hohe Kosten für Versuchs- oder P+D-Anlagen anfallen, ist die internationale Zusammenarbeit von besonderer Bedeutung.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht, (ZB) Zwischenbericht

(SB) Schlussbericht, Projektnummer

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

- [1] D. Pahud, (daniel.pahud@dict.supsi.ch), LEE – 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)
- [2] D. Pahud, (daniel.pahud@dict.supsi.ch), LEE – 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)
- [3] L. Laloui, (lyesse.laloui@epfl.ch), EPFL – ENAC, *Lausanne: Actualisation du Mini-module de chauffage pour tests de réponse thermique des terrains* (SB, 101'189)
- [4] J. Poppei, (POJ@colenco.ch), COLENCO POWER ENGINEERING AG, *Baden: Groundwater Energy Designer (GED). Computergestütztes Auslegungstool zur Wärme- und Kältenutzung von Grundwasser* (SB, 101'144)
- [5] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, *Aarau: Erstellung von Richtlinien für Grundwasser- Wärme- und Kältenutzungsanlagen* (SB, 101'335)
- [6] U. Schärli, (ueli.schaerli@geophysik.ch), DR. U. SCHÄRLI GEOLOGIE + GEOPHYSIK, *Zürich: 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* (JB, 101'289)
- [7] E. Rohner, (rohner@geowatt.ch), GEOWATT AG, *Zürich: Erfahrungsbericht Heizen/Kühlen mit Erdwärmekörben*
- [8] W. Leu (werner.leu@geoform.ch), GEOFORM AG, *Minusio: Update «SwEWS» Software zur Auslegung von Erdwärmesonden-Anlagen* (SB, 101'296)
- [9] S. Bassetti, (bassetti@geowatt.ch), GEOWATT AG, *Zürich: Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden* (SB, EnergieSchweiz)
- [10] J. Wilhelm, (jules.wilhelm@bluewin.ch), INGENIEUR-CONSEIL, *Pully: Concept de drainage des tunnels en vue d'une optimisation de l'utilisation géothermique* (SB, 101'292)
- [11] G. Bianchetti, (bianchetti@alpgeo.ch), ALPGEO SARL, *Sierre: Géothermie du cristallin profond de la vallée du Rhône (phase A)* (SB, 101'445)
- [12] F.-D. Vuataz, (francois.vuataz@unine.ch), CREGE, *Neuchâtel: Base de données des fluides géothermiques de la Suisse (BDFGeotherm)* (JB, 101'824)
- [13] F.-D. Vuataz, (francois.vuataz@unine.ch), ARBEITSGEMEINSCHAFT DHM, *Genf: Géothermie de grand profondeur (GGP) à Genève – travaux préparatoires du 1^{er} forage d'exploitation* (SB)
- [14] M. Häring, (haring@geothermal.ch), GEOPOWER AG, *Pratteln: Wissenschaftlicher Beirat für Deep Heat Mining in Basel*
- [15] S. Signorelli, (signorelli@geowatt.ch), SCHWEIZERISCHE GEOPHYSIKALISCHE KOMMISSION (SGPK), *Zürich: Geo-thermische Ressourcen: Erarbeitung und Bewertung des geothermischen Potentials der Schweiz, Phase 2006* (JB, 100'022)
- [16] R. Minder, (rudolf.minder@bluewin.ch), MINDER ENERGY CONSULTING, *Oberlunkhofen: Energy Conversion Processes for the Use of Geothermal Heat* (SB, 101'288)
- [17] Th. Mégel, (megel@geowatt.ch), GEOWATT AG, *Zürich: Teilnahme am Geothermal Implementing Agreement der IEA, Fortsetzung 2006* (JB, 41'661)
- [18] 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

- [19] B. Sigg, (info@doldergrand.ch), DOLDER GRAND HOTEL, *Zürich: Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS-Feld Hotel Dolder Zürich* (JB, 100'878)
- [20] M. Hubbuch, (m.hubbuch@hswzfh.ch), FH Wädenswil, *Wädenswil: Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen* (JB, 37'373)

Referenzen

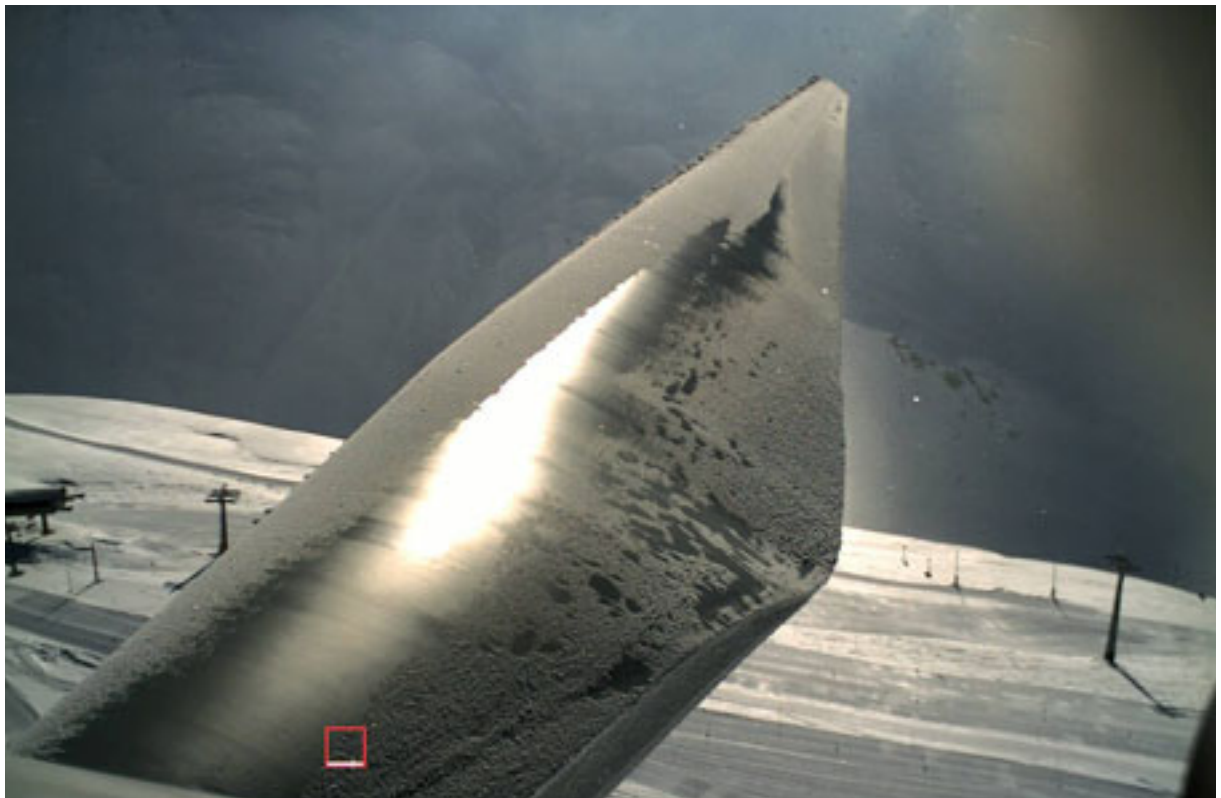
- [21] **Bericht der Geopower Basel AG zu den seismischen Ereignissen, inkl. Stellungnahme der Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirats:** <http://www.geopower-basel.ch/html/Bericht.html>
- [22] **Web-Site des Baudepartements des Kantons BS mit download-Möglichkeit relevanter Dokumente zum Projekt Deep-Heat-Mining Basel:** <http://www.bd.bs.ch/geothermie>
- [23] **Spezielle Website des Schweizerischen Erdbebendienstes SED:** <http://www.seismo.ethz.ch/basel/>
- [24] **The Future of Geothermal Energy - Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century**, J. W. Tester *et al.*, Massachusetts Institute of Technology, (http://geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf)
- [25] **Projekt Erfolgskontrolle und Wirtschaftlichkeitsanalyse von Messkampagnen zu P&D Anlagen**, S. Bassetti, E. Rohner, L. Rybach, und S. Sellami, Schlussbericht zum Forschungsprojekt Erfolgskontrolle u. Wirtschaftlichkeitsanalyse von P+D-Projekten (SB, 240'087), September 2004.

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM WIND

Robert Horbaty

robert.horbaty@enco-ag.ch



Vereistes Rotorblatt der 600 kW-Anlage auf dem Gütsch

Im Rahmen des Projektes «Alpine Test Site Gütsch» wurde die vom Elektrizitätswerk Ursern installierte Windkraftanlage umfassend mit Datenerfassungssystemen ausgerüstet. Unter anderem mit einer Webcam, mit welcher die Vereisung am laufenden Rotor festgestellt werden kann (online abrufbar unter http://www.meteotest.ch/cost727/webcam_e40.html).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Schwerpunkte des *Energieforschungsprogramms Windenergie* [17, 18] sind:

- 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 2006

ERHÖHUNG DER AKZEPTANZ DER WIND-ENERGIENUTZUNG

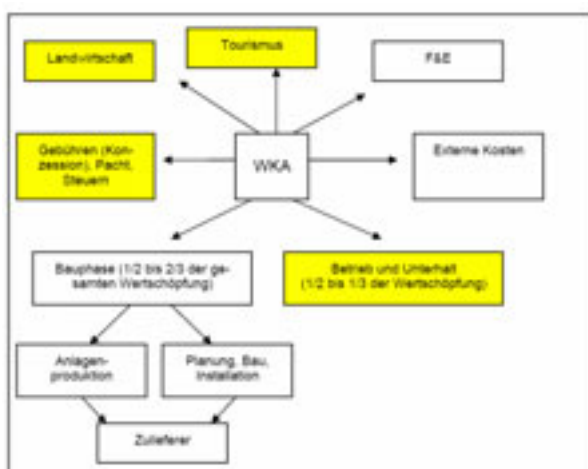
Im Rahmen des Projektes *Auswirkung von Windkraftanlagen in der Schweiz* [1] werden mit Hilfe von bisher in der Schweiz sowie im Ausland gemachten Erfahrungen Wege aufgezeigt, durch welche die Planung und Erstellung von Windkraftanlagen (WKA) zu vereinfachen, zu beschleunigen und die Projektrisiken zu vermindern sind. Das Projekt bezweckt, konsolidierte Erkenntnisse zu Auswirkungen von Windkraftanlagen zu liefern, die für den Entwurf, die Bewilligung, und die Akzeptanz von künftigen bzw. auch aktuellen Projekten relevant sind. Als Hauptprodukte dieses Projekts werden ein Leitfaden für Investoren und ein Musterbericht «UVB/UEP» erarbeitet.

Ziel der bisherigen Arbeiten war die Identifizierung von Auswirkungen von WKA auf die Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft sowie von wichtigen Erfolgsfaktoren realisierter Projekte in der Schweiz. Dazu wurden diverse ausländische und

inländische Studien ausgewertet. Die Relevanz der identifizierten Auswirkungen für die Schweiz wurde eingeschätzt und in einer Relevanztafel zusammenfassend dargestellt. Mittels telefonischen Interviews mit Betreibern/Initianten von WKA in der Schweiz wurden die Erfolgsfaktoren bei realisierten Projekten sowie die Hemmnisse bei verzögerten bzw. sistierten Projekten identifiziert. Fig.1 zeigt, mit welchen wirtschaftlichen Auswirkungen gerechnet werden muss. Vertiefende Hinweise wird der geplante Austausch mit der *Groupe de planification romande* bringen, welche das von den Bundesämtern BFE, BAUFU und ARE erarbeitete *Konzept Windenergie Schweiz* [19] auf kantonaler Ebene umsetzt.

Die Integration von Windenergie im schweizerischen Versorgungsnetz ist von einer gewissen Bedeutung: Bereitstellung von Regelenergie – auch im internationalen Kontext, optimale Bewirtschaftung eines regionalen oder lokalen Netzes mit einem hohen Anteil an unregelmässig anfallender Energieproduktion. Basierend auf dieser Überlegung beteiligt sich die Schweiz seit 2005 am IEA-Projekt *IEA Wind Task 24 Wind/Hydro-Integration* [2]. Leider steht heute nicht mehr der Erfahrungsaustausch und die Entwicklung von konkreten Regelstrategien im Vordergrund, sondern die doch recht theoretische Validation von Modellen. Eine weitere Teilnahme am Projekt wird deshalb geprüft.

Der Boom der Windenergie verbreitet sich weltweit ungebrems, die installierte Leistung hat alleine im Jahre 2005 um 24% auf 59,084 MW zugenommen [20]. Die Kehrseite dieser Medaille ist die Tatsache, dass Windenergie-Projekte mehr und mehr mit Akzeptanzproblemen zu kämpfen haben – gerade auch in der Schweiz. Vom 16. bis 18. Februar 2006 fand in Tramelan die Tagung statt *Research Workshops on Public Acceptance of Wind Energy in Switzerland* [5] des Instituts für Wirtschaft und Ökologie der Universität St. Gallen (IWÖ-HSG) (Fig. 2). Folgende Erkenntnisse konnten aus dieser vom Forschungsprogramm



Figur 1: Wirkungsmodell Wirtschaft für Bau, Betrieb und Unterhalt von WKA (Windkraftanlagen), gelbe Felder = regionalwirtschaftliche Auswirkungen. Quelle: econcept.

«Wind» des BFE mitfinanzierten Tagung gewonnen werden:

- Die Teilnahme von rund 25 internationalen Wissenschaftler zeigte an, dass die Akzeptanzfragen rund um die Windenergienutzung an Brisanz zugenommen haben.
- Die Diskussionen bewegen sich meist noch auf theoretischem Niveau, konkrete Lösungen sind aber ansatzweise erkennbar.
- Das Thema scheint bis heute an Windenergie-Projektentwicklern oder auch Anlagenherstellern vorbei zu gehen. Mit wenigen Ausnahmen rekrutierten sich alle TeilnehmerInnen aus dem Bereich der Sozialwissenschaften und nicht Ingenieurwissenschaften.
- Es darf wohl behauptet werden, dass in Zukunft ein Zusammenwirken von planerischer und sozialwissenschaftlicher Kompetenz für erfolgreiche Projektentwicklungen notwendig sein wird.



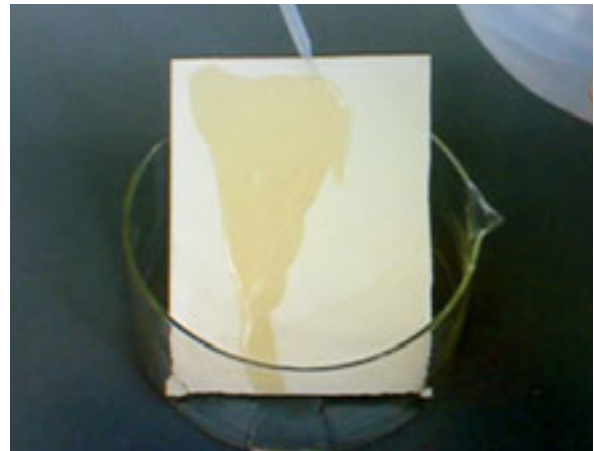
Figur 2: Rund 25 Fachleute nahmen am internationalen Workshop zum Thema Akzeptanz in Tramelan teil. Quelle: Institut für Wirtschaft und Ökologie der Universität St. Gallen.

Erste Gespräche innerhalb der IEA im Rahmen des *Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development* haben deutlich gemacht, dass ein grundsätzliches Interesse am Thema «soziale Akzeptanz» besteht. Im Mai 2007 wird nun ein **IEA Topical Expert Meeting «Social Acceptance»** [9] in Luzern durchgeführt. Anlässlich dieses Treffens soll das Thema soziale Akzeptanz unter den Windenergie-Experten breit lanciert werden. Insbesondere soll der «ressortübergreifende» Erfahrungsaustausch von Sozialwissenschaftlern und Ingenieuren eine Plattform zur Erarbeitung von konkreten Strategien bieten, wie die Branche mit Akzeptanzfragen umgehen soll.

ENTWICKLUNG VON INNOVATIVEN KOMPONENTEN

Nanotechnologen entwickeln u.a. Methoden, die es erlauben Farben, Textilien, Ziegelsteine und

andere Oberflächen so zu behandeln, dass sie trocken bleiben und sich selbst reinigen können wie das Lotusblatt (siehe Fig. 3).



Figur 3: Beispiel des Einsatzes von Nano-Coatings. Oben: Benetzung einer unbeschichteten Steinplatte. Unten: Benetzung einer mit Nano-Coating beschichteten Steinplatte. Der wasserabstossende «Lotuseffekt» ist klar ersichtlich. Quelle: Zürcher Hochschule Winterthur.

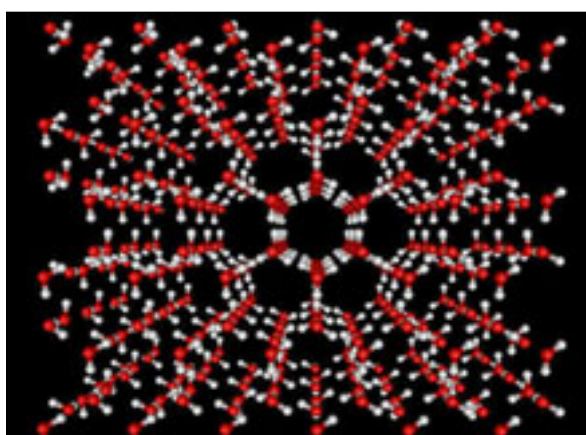
Im Schlussbericht des Projektes **Nanooberfläche für Rotorblätter von Windenergieanlagen – Phase 1** [15] wird der Stand der Forschung auf dem Gebiet der Beschichtungen, die gegen das Anwachsen von Eis auf Rotorblätter von Windenergieanlagen wirksam sind, dargestellt. Die bisher getesteten Beschichtungen zeigen zwar eine Verringerung der Haftung und Bildung von Eis auf Oberflächen, diese ist jedoch nicht ausreichend. Beschichtungen mit anti-freeze Eigenschaften analog zu anti-freeze Proteinen eröffnen neue Möglichkeiten zur Reduktion der Eisbildung auf Oberflächen.

Rotorblätter für Windenergieanlagen können bis zu 60 Meter lang sein. Sie werden aus glasfaserverstärktem Kunststoff hergestellt. Heutzutage

werden die Rotorblätter oft an den Profilvorderkanten mit einem Klebeband gegen meteorologische Einflüsse geschützt.

Die Autoren der Studie präsentieren einen Vorschlag für vereisungsvorbeugende Beschichtungen basierend auf der Wirkung von anti-Frost Proteinen. Im Gegensatz zu traditionellen Frostschutzmitteln ist die Wirkung von anti-Frost Proteinen nicht proportional zu deren Konzentration.

Anti-Frost Proteine verhindern das Kristallwachstum (Beispiel der Struktur eines Eiskristalls in Fig. 4), und die Eisbildung erfolgt erst bei wesentlich tieferen Temperaturen. Synthetisch hergestellte Polymere können den Effekt der natürlichen anti-Frost Proteine ebenfalls aufweisen.



Figur 4: Aufsicht auf die Basisfläche eines hexagonalen Eiskristalls. Das Kristall besitzt eine ziemlich offene Struktur, die eine eher niedrige Packungsdichte ($\approx 1/3$) aufweist. Quelle: Zürcher Hochschule Winterhur.

Zum heutigen Zeitpunkt existieren noch zu wenige Untersuchungen über die Wirkung von anti-Eis-Beschichtungen, um eindeutige Aussagen über deren Verwendung bei Windenergieanlagen zu machen. Das vorgeschlagene Nachfolgeprojekt beinhaltet folgende Punkte:

- Systematische Untersuchung von Beschichtungen (hydrophob, superhydrophob, eishphob, anti-Frost).
- Entwicklung von Polymeren, die analog zu anti-Frost Proteinen wirken.
- Optimierung der Haftung und der Beständigkeit der neu entwickelten Beschichtungen.

Das Potenzial des geplanten Projekts zur Entwicklung von stabilen anti-Eis-Beschichtungen für Windenergieanlagen ist nach der Meinung der Autoren gross. Eine entsprechende Beschichtung würde für Standorte mit kaltem Klima, beispielsweise in den Alpen, Skandinavien, Canada, u.s.w., grosse Vorteile bringen.

Leider musste das Projekt **Prototyp Windturbinenrotor mit zyklischer Pitch- und Twist-**

Verstellung [4] abgebrochen werden, da die beteiligte Firma in Konkurs ist. Einer der Gründe für den zurückhaltenden Markterfolg könnte auf die schon bestehende grosse Nachfrage und Lieferengpässe der Hersteller für den herkömmlichen Markt zurückzuführen sein. Die Hersteller von Windenergieanlagen sind zur Zeit an radikal neuen Konzepten nicht interessiert.

Mit dem Projekt **Screening Windenergiebranche Schweiz** [10] wird klar aufgezeigt, dass sich auch in unserem Land die Wirtschaft am Boom der Windenergie beteiligt, was ein nicht unwesentlicher Beitrag zur Erhöhung der Akzeptanz dieser Technologie darstellt. Dabei ist die Schweizer Wirtschaft heute insbesondere in den folgenden Bereichen aktiv:

- Entwicklung und Produktion von chemischen Grundstoffen für die Produktion von Rotorblättern (Harze, Kleber)
- Entwicklung und Produktion von Leistungselektronik-Komponenten (insbesondere Wechselrichter)
- Dienstleistungen für die Projektentwicklung (inkl. meteorologische Daten)
- Spezielle Nischen, wie z.B. die Entwicklung und Produktion von Eiswarnsystemen.

Einzelne Firmen haben sich als Zulieferer eine Spitzenposition im internationalen Windenergiemarkt erobert, obwohl sie auf keinen umfassenden Heimmarkt zählen können. In der Maschinenindustrie konnten nur vereinzelte Aktivitäten eruiert werden, obwohl hier ebenfalls ein bedeutendes Potenzial vorhanden ist.

Insgesamt umfassen die oben genannten Bereiche heute in der Schweiz einen Umsatz von rund 130 Mio. Franken pro Jahr resp. rund 300 Vollzeit-Arbeitsplätze. Die Bereiche der chemischen Grundstoffe und der Leistungselektronik teilen sich rund 95% des Marktvolumens nahezu gleichmässig auf. Man kann davon ausgehen, dass ein zusätzliches bedeutendes Potenzial für den Wirtschaftsplatz Schweiz besteht. Indizien dafür sind, dass einzelne Schweizer Konzerne den Bereich Windenergie weitgehend über Tochtergesellschaften im Ausland bearbeiten, und dass zahlreiche Firmen Interesse am Windenergiemarkt zeigen.

ENTWICKLUNG VON SPEZIFISCHEN KONZEPTEN

Die Firma *Aventa AG* vertreibt seit 2001 eine 7 kW-Windkraftanlage, deren herausragende 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. Heute sind 14 Anlagen in Betrieb, an einigen Standorten bestehen über 4 Jahre Betriebserfahrung. Mit Kosten von mehr als 130'000 CHF pro Anlage resultieren Stromgestehungskosten vergleichbar mit der Photovoltaik. Um eine weitere Förderung zur Optimierung dieser Anlage zu legitimieren, wird von der Fachhochschule Technik und Wirtschaft in Berlin im Auftrag des BFE dieses Konzept grundsätzlich evaluiert (**Evaluation Leichtwindkonzept AVENTA** [13]), begleitet durch die Herstellerfirma (**Unterstützung Evaluation Leichtwindkonzept AVENTA** [14]).

AUFBAU KOMPETENZZENTRUM WINDENERGIE-NUTZUNG IM GEBIRGE

Konkretes Resultat des Forschungsprojektes «*Alpine Test Site Gütsch: Meteorological measurements and wind turbine performance analysis*», welches im Rahmen der COST Action 727 [25] von 2005 bis 2008 durch das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (*MeteoSchweiz*) und durch *Meteotest* durchgeführt wird, ist die Verbreitung der bisherigen Ergebnisse über eine Fachtagung und ein Handbuch (**Alpine Test Site Gütsch, Handbuch und Fachtagung** [7]). Im Weiteren wurde ermittelt, inwieweit dieser optimal mit Messinstrumenten ausgerüstete Standort nicht als Testsite für weitere Windkraftanlagen dienen könnte (**Konzept Wind Turbine Test Site Gütsch** [12]).



Figur 5: Mögliche Test-Standorte für kleine Windkraftanlagen (≤ 10 kW) in der Nähe der SwissMetNet Station auf dem Gütsch. Quelle: Meteotest.

Die Abklärungen zeigen, dass es sich nicht lohnt, eine Infrastruktur (mögliche Standorte in Fig. 5) aufzubauen, bevor Aufträge für Anlagentests vorliegen. Die bescheidene Reaktion der Anlagenhersteller auf die E-Mail Umfrage ist ein Indiz dafür, dass zurzeit keine grosse Nachfrage für einen derartigen Standort besteht.

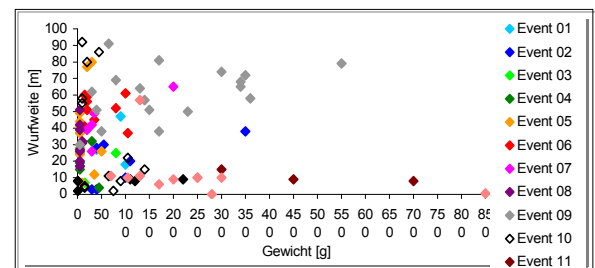
Detaillierte Untersuchungen zum möglichen Eiswurf von Windkraftanlagen sind ein wichtiger Bestandteil des IEA Forschungsprojektes **Wind**

Energy in Cold Climates [3]. Dank der gut ausgebauten Infrastruktur und der Möglichkeit, unmittelbar nach einer an der Anlage festgestellten Vereisung die Umgebung der Anlage nach Eisstücken abzusuchen, kann die Schweiz mit den Resultaten vom Gütsch wesentlich zur Klärung dieser Fragenstellung beitragen.

In Fig. 6 sind alle gefundenen Stücke als Wurfweite über Gewicht, farblich geordnet nach den 13 Ereignissen, eingetragen. Auffällig ist, dass sich mit Abstand die meisten Abwürfe mit Gewichten zwischen 0 und 100 g abgespielt haben. Die Hauptgefahr geht vermutlich von Klareisvereisungen aus. Die grössten Wurfweiten werden von diesem Eistyp erzielt. Die Dichte ist hoch und somit auch das Gewicht. Raureis ist weniger gefährlich, da die Wurfweiten nicht ganz so gross sind. Klareisvereisungen spielen sich nur knapp um den Gefrierpunkt ab wenn die Luftfeuchtigkeit sehr hoch ist, oder wenn Regentropfen aus wärmeren Wolken auf kalte Oberflächen treffen und anfrieren. Wenn solche Bedingungen eintreten, kann von erhöhtem Risiko gesprochen werden.

Fig. 7 zeigt zudem eindrücklich, dass Eiswurf im Gebirge auch im Hochsommer eintreten kann!

Das im Jahre 2005 auf Deutsch publizierte Handbuch zu Sicherheitsrichtlinien [27] – welches sich auch zu Fragen des Eiswurfes äussert – wurde ins Französische übersetzt (**Übersetzung Sicherheitsrichtlinien für Windenergie-Anlagen** [8]).



Figur 6: Darstellung der gefundenen Eisstücke am Standort Gütsch, Wurfweite nach Gewicht.



Figur 7: Eiswurf am Standort Gütsch, aufgenommen im Hochsommer (12.8.2006). Quelle: Meteotest.

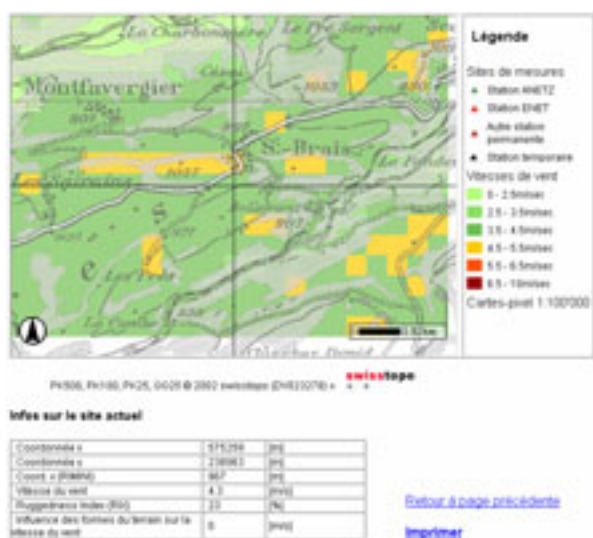
Nationale Zusammenarbeit

Folgende Forschungsinstitutionen haben Aktivitäten im Bereich der Windenergie entwickelt:

- Die EPFL (Laboratoire de Systèmes Énergétiques LASEN) [21] betreut Windenergie-Projekte, insbesondere auch im Zusammenhang mit der Entwicklungszusammenarbeit.
- An der Fachhochschule Wallis [22] 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 Nanoober-

flächen zur Verhinderung von Vereisung der Rotorblätter [23].

- Die Fragestellungen rund um die Regelenergie für Windkraftanlagen fanden am ETH-Institut CEPE (Center for Energy Policy and Economy) das Interesse von Dr. Reinhard Madlener [24].
- Anlässlich der letzten Programmleitersitzung präsentierte der Programmleiter «Windenergie» das Konzept **The «Smart Energy Network» oder «Interactiv Distribution Energy Network»** [31] welches die Transformation des bestehenden Stromnetzes in ein elastisches und interaktives (Versorger/ Kunde) «Dienstleistungs-Versorgungsnetz» zum Ziel hat. Es wurde beschlossen, dieses Thema als fachübergreifendes Forschungsthema weiter zu verfolgen.



Figur 8: Informationen zu möglichen Standorten auf dem Internet von Suisse Eole (<http://www.wind-energie.ch/techpro-outils-d.htm>).

Der Dreh- und Angelpunkt zur Förderung der Windenergie in der Schweiz ist *Suisse Eole*, die Schweizerische Vereinigung zur Nutzung der Windenergie [26]. Sämtliche Planungsinstrumente, insbesondere ein Map-Server mit allen relevanten Aussagen zu möglichen Windenergie-Standorten (siehe Fig. 8) sind auf der Website von *Suisse Eole* (www.wind-energie.ch) vorhanden.

Gemeinsam mit dem Verein *energie-cluster.ch* führte *Suisse Eole* zwei Veranstaltungen zum Thema «F&E, Knowhow-Transfer und Markt im Bereich Windenergie» durch [28].

Wichtige Eckpunkte im Bereich der Windenergieentwicklung in der Schweiz sind das wegweisende Urteil des Bundesgerichts vom 31.8.2006 [29], sowie die sich abzeichnende kostendeckende Einspeisevergütung für Strom aus erneuerbaren Energien [30].

Internationale Zusammenarbeit

Seit 2002 beteiligt sich die Schweiz am IEA-Projekt **Wind Energy in Cold Climates (WECCO)** [3]. 2006 fanden zwei Treffen der Experten statt.

Die Schweiz beteiligt sich auch am IEA-Projekt **Integration of Wind and Hydropower Systems** [2]. Die Experten trafen sich 2006 einmal.

Am Kongress der *Global Wind Energy Council (GWEC)* [32] präsentierte der Programmleiter einem interessierten Publikum das **Konzept Windenergie Schweiz** [19].

Die Arbeiten beim **Alpine Test Site Gütsch** [25] sind verknüpft mit dem IEA Projekt **Wind Energy in Cold Climates**. Dessen Resultate und Empfehlungen werden nun im Rahmen des Forschungsvorhabens *COST 727 Alpine Test Site Gütsch, Meteorological measurements and wind*

turbine performance analysis verifiziert und einem weiteren Umfeld nutzbar gemacht. Im März 2006 fand ein internationales Meeting zu diesem Projekt in Andermatt statt.

An der Tagung **Research Workshops on Public Acceptance of Wind Energy in Switzerland** [5] des Instituts für Wirtschaft und Ökologie der Universität St. Gallen (IWÖ-HSG) vom Februar 2006 in Tramelan nahmen 25 internationale Expertinnen und Experten teil. Basierend auf den entsprechenden Erfahrungen soll im Mai 2007 ein «Topical Expert Meeting» der IEA zu diesem Thema in Luzern stattfinden.

Die Fachhochschule Technik und Wirtschaft in Berlin evaluiert das **Leichtwindkonzept der Firma AVENTA** [13].

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Sinne einer eigentlichen Erfolgskontrolle werden die Betriebserfahrungen der installierten Windenergieanlagen kontinuierlich erfasst. Die entsprechenden Erfahrungen dienen weiteren Projektentwicklern zur Optimierung ihrer Vorhaben.

Mit Abstand am besten läuft die 2 MW Anlage *Enercon E70* der Firma Rhoneole in Collonges im Kanton Wallis (Fig. 9, siehe auch die Publikation **Campagne de mesures (Erfolgskontrolle) 2MW éolienne à Collonges VS** [11]). Diese Anlage generierte im Jahre 2006 mehr als 4 GWh elektrische Energie, wodurch ein bisher in der Schweiz unerreichter Kapazitätsfaktor von 20% resultierte.



Figur 9: 2 MW-Anlage Enercon E70 in Collonges, Jahresproduktion 2006 über 4 GWh. Quelle: Rhoneole.

Mit dem Projekt **Betriebsresultate der Windenergieanlage Feldmoos** Rengg/Entlebuch auf 1020 m.ü.M. [6] werden bei einer 900 kW-Windenergieanlage die Betriebsergebnisse gesammelt. Ziel ist es Erfahrungen zu sammeln in Bezug auf Energieertrag, Verfügbarkeit, Eiswurf, Wildtiere, Blitzeinschläge einer Anlage im Voralpenraum. Erste Vergleiche mit der Messstation Napf ergaben, dass der durchschnittliche Jahresertrag bei etwa 950 MWh liegt. Das entspricht ziemlich genau dem errechneten Jahresertrag laut Windgutachten. Da aber die letzten zwei Jahre (2005 und 2006) relativ schlechte Windjahre waren, verändert sich der Jahresdurchschnitt negativ und kommt tiefer zu stehen (2006 z. Bsp. 646 MWh). Gemäss Vertrag mit dem Hersteller wird für eine einzelne Anlage 95% Verfügbarkeit garantiert. Momentan ist die Anlage mit 99% sehr gut verfügbar. Störungen waren bisher das Rundsteuersignal des Netzbetreibers, ein Blitzschaden der Trafostation und defekte Sensoren (Druck- und Drehzahlsensor).

Am Standort *Peu Girard* (Koordinaten 565.900/229.300) wurden mit dem Projekt **Standortabklärungen Windkraftanlagen Peu Girard, Les Breuleux (JU)** [16] die Bedingungen für eine WKA genauer untersucht. Ziel ist es, ein Projekt für eine Windturbine der Grössenklasse 1000 kW mit einer Turmhöhe von mindestens 70 m auszuarbeiten, welches alle raumplanerischen, ökologischen und anderen Auflagen für eine Baubewilligung erfüllt.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Obwohl sich im Jahre 2006 die installierte Leistung der Windkraftanlagen in der Schweiz nicht erhöhte, wurden von den 31 Anlagen, welche während des ganzen Berichtsjahrs in Betrieb waren, doch 15 GWh Elektrizität erzeugt. Dies entspricht einer Steigerung um mehr als 75 % gegenüber dem Vorjahr.

Der Abbruch des Projekts **Prototyp Windturbinenrotor mit zyklischer Pitch- und Twist-Verstellung** (siehe oben) zeigt, dass in einem Markt, welcher jährlich über 20% wächst, und in dem mit 2 Jahren Lieferzeit für Neuanlagen gerechnet werden muss, die Bereitschaft für fundamental neue Ideen und Strategien relativ gering ist.

Mit dem aus Sicht der Windenergienutzung als positiv zu bewertenden Bundesgerichtsentscheid vom 31.8.2006 und einer allfälligen kostendeckenden Einspeisevergütung im Jahre 2008, sind die Aussichten für eine intensivierte Nutzung der Windenergie durchaus als optimistisch zu beurteilen.

Auf internationaler Ebene sind die Aktivitäten im Zusammenhang mit der Teststation auf dem Gütsch zur fundierten Ermittlung der Auswirkungen der Vereisung im Rahmen der *COST Action 727* besonders zu erwähnen. Im Rahmen der IEA werden hier aus der Schweiz substantielle Forschungsbeiträge geleistet.

Mit folgenden Aktivitäten sollen die Ziele des Energieforschungskonzepts 2004-2007 [18] weiter konkretisiert werden:

- **Erhöhung der Akzeptanz** für Windenergie unter Einbezug sozialwissenschaftlicher Kompetenz und damit Verkürzung der Projektrealisierungsdauer. Ermittlung der Auswirkungen auf Vogelzug und Fledermäuse. Die Kantone sollen für ihre Planungen / Richtplanungen die Grundlagen für Windkonzepte in einfacher, praktischer Form erhalten. Allenfalls lassen sich die Daten als GIS-Dateien für die Fachleute und als Arc-Reader Infos plus EXCEL Tabellen aufbereiten. So hätten auch Nicht-GIS-

Fachleute ein gutes Tool, um die Resultate aus dem Windkonzept optimal zu nutzen.

- **Entwicklung von Anlagekomponenten**, mit Schwergewicht auf der Weiterführung des Projektes *Nanotechnologie*.
- **Erhöhung des «Wertes» der Windenergie**, Optimierung der Integration von Windkraftanlagen in das Stromversorgungsnetz (Forecasting, Regenergie).

Im Bereich der Akzeptanz für Windenergie kann die Schweiz als relativ dicht besiedeltes Land auch international eine wichtige Rolle übernehmen. Die Resultate des «Topical Expert Meeting» der IEA zu diesem Thema in Luzern im Mai 2007 könnten zu weiterführenden diesbezüglichen Anstrengungen im Rahmen der IEA führen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 vorhanden

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

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

- [1] Walter Ott, Yvonne Kaufmann, (walter.ott@econcept.ch), <http://www.econcept.ch/> ECONCEPT AG, Zürich: **Auswirkung von Windkraftanlagen in der Schweiz** (JB)
- [2] Patricia Weis-Taylor, (pwt_communications@comcast.net), <http://www.ieawind.org/> NREL: **Teilnahme IEA Wind Task 24 Wind/Hydro** (JB). http://www.ieawind.org/Annex_XXIV.html
- [3] Patricia Weis-Taylor, (pwt_communications@comcast.net), <http://www.ieawind.org/> NREL IEA-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development, Task 19 **Wind Energy in Cold Climates**: <http://arcticwind.vtt.fi/>. (JB)
- [4] Ferdinand Lutz (ferdinand.lutz@blatec.ch, <http://www.blatec.ch>) Blatec Sarnen: **Prototyp Windturbinenrotor mit zyklischer Pitch- und Twist-Verstellung** (JB).
- [5] Dr. Rolf Wüstenhagen (rolf.wuestenhagen@unisg.ch), <http://www.iwoe.unisg.ch/org/iwo/web.nsf/> Institute for Economy and the Environment (IWÖ-HSG) University of St. Gallen: **Research Workshops on Public Acceptance of Wind Energy in Switzerland** (SB)
- [6] Roland Aregger (INFO@WINDPOWER.CH, [HTTP://WWW.WINDPOWER.CH](http://WWW.WINDPOWER.CH)), WINDPOWER AG, Entlebuch: **Betriebsresultate der Windenergieanlage Feldmoos** (JB)
- [7] Stefan Kunz, René Cattin (KUNZ@METEOTEST.CH, [HTTP://WWW.METEOTEST.CH](http://WWW.METEOTEST.CH)), METEOTEST, Bern: **Alpine Test Site Gütsch**, Handbuch und Fachtagung (JB) <http://www.meteotest.ch/cost727/index.html>
- [8] Martin Kernen (contact@suisse-eole.ch, <http://www.suisse-eole.ch>), SUISSE EOLE, La Sagne: **Übersetzung Sicherheitsrichtlinien für Windenergie-Anlagen**
- [9] Robert Horbaty (robert.horbaty@enco-ag.ch, www.enco-ag.ch) ENCO ENERGIE-CONSULTING AG, Bubendorf: **IEA Topical Expert Meeting»Social Acceptance** (JB)
- [10] Reto Rigassi (reto.rigassi@eicher-pauli.ch, www.eicher-pauli.ch), Eicher+Pauli AG, Liestal: **Screening Windenergiebranche Schweiz** (SB)
- [11] Jean-Marie Rouiller (jean.marie.rouiller@lausanne.ch, <http://www.lausanne.ch>) Services industriels de Lausanne, Lausanne, **Campagne des mesures (Erfolgskontrolle) 2MW éolienne à Collonges VS**
- [12] Stefan Kunz, René Cattin (KUNZ@METEOTEST.CH, [HTTP://WWW.METEOTEST.CH](http://WWW.METEOTEST.CH)), METEOTEST, Bern: **Teststandort für Windturbinen Gütsch, Vorstudie** (SB)
- [13] Joachim Twele (mailto:twele@fhtw-berlin.de, <http://www.fhtw-berlin.de/>), FACHHOCHSCHULE FÜR TECHNIK UND WIRTSCHAFT, Berlin DE: **Evaluation Leichtwindkonzept AVENTA** (JB)
- [14] Ueli Spalinger (aventa@energienetz.ch, <http://www.aventa.ch>), AVENTA, Winterthur: **Unterstützung Evaluation Leichtwindkonzept AVENTA** (JB)
- [15] Martina Hirayama (martina.hirayama@zhwin.ch, <http://www.zhwin.ch>) ZÜRCHER FACHHOCHSCHULE WINTERTHUR, Winterthur, **Nanooberfläche für Rotorblätter von Windenergieanlagen – Phase 1** (SB)

Liste der P+D-Projekte

- [16] Eric Nussbaumer (info@adev.ch, <http://www.adev.ch>), ADEV, Liestal: **Les Breuleux** (SB)

Referenzen

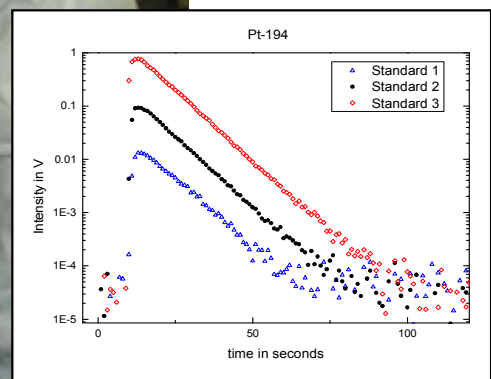
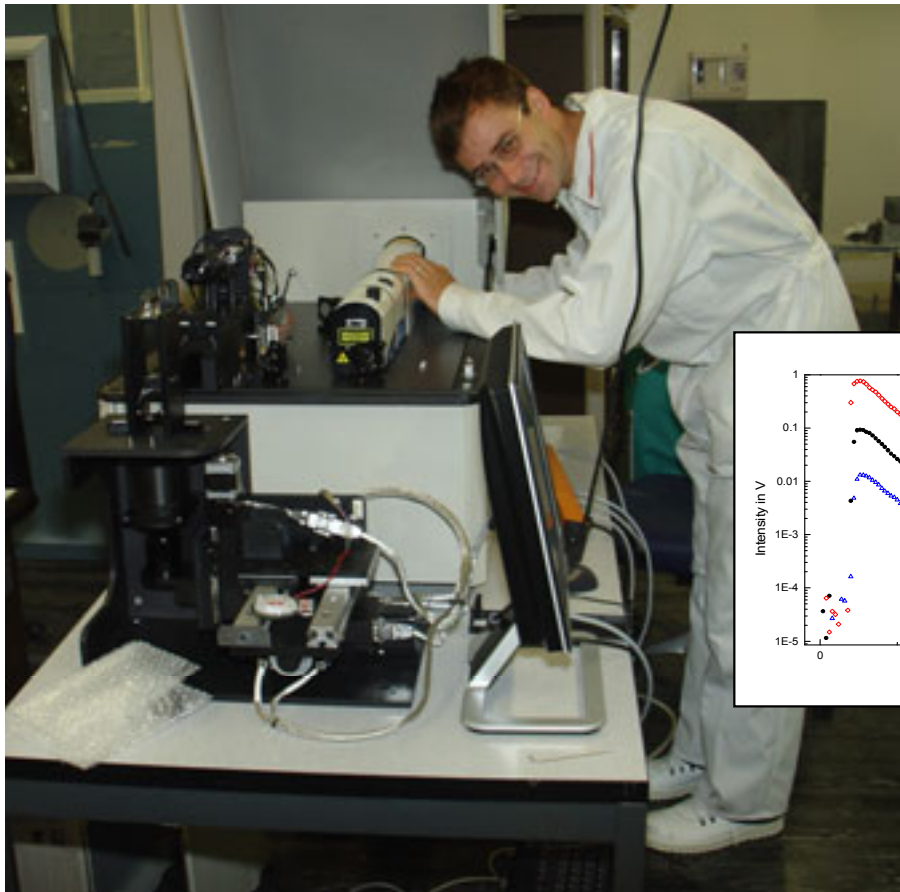
- [17] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007**, ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE: <http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/index.html?lang=de>.
- [18] **Energieforschungsprogramm «Windenergie» 2004 – 2007**, ausgearbeitet durch R. Horbaty, von der CORE am 1.4.2004 zur Umsetzung freigegeben.
- [19] **Konzept Windenergie Schweiz**, Grundlagen für die Standortwahl von Windparks, Bundesamt für Energie (BFE), Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Autoren Meteotest, Nateco, Metron Raumentwicklung AG, Atelier North & Robyr Soguel, Bern 2004 www.wind-energie.ch/images/1140/CH/KonzeptWindenergieCH-d.pdf
- [20] **GWEC: Record year for wind energy: Global wind power market increased by 24% in 2005** http://www.gwec.net/index.php?id=30&no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=21&tx_ttnews%5BbackPid%5D=4&cHash=d0118b8972)
- [21] EPFL, **Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**, Laboratoire de systèmes énergétiques LASEN: <http://lasen.epfl.ch/page39406.html>.
- [22] Hp. Biner, **Hochschule Wallis, Institut des systèmes industriels**: <http://energy.hevs.ch/f/rad/conversion.asp>.
- [23] ZFW, **Zürcher Fachhochschule Winterthur**, Martina Hirayama (martina.hirayama@zhwin.ch, <http://www.zhwin.ch>,
- [24] ETH, **Centre for Energy Policy and Economics**, Dr. Reinhard Madlener, rmadlener@ethz.ch <http://www.cepe.ethz.ch/>
- [25] **Alpine Test Site Güttsch, Website zu diesem COST 727-Projekt** <http://www.meteotest.ch/cost727/index.html>
- [26] **Schweizerische Vereinigung für Windenergie, Suisse Eole**: <http://www.suisse-eole.ch>.
- [27] Sicherheitsrichtlinien für Windenergieanlagen in der Schweiz, ausgearbeitet durch Suisse Eole, 2005
- [28] **Veranstaltungen mit Energie-Cluster** zum Thema «F&E, Know-how Transfer und Markt im Bereich Windenergie» <http://www.energie-cluster.ch/bereiche/wtt/AG-Wind>
- [29] **Das Urteil des Bundesgericht zum Windpark Crêt Meuron** <http://www.wind-energie.ch/images/1140/CH/SEO-MM-BGurteil.pdf>
- [30] **Materialien zur Debatte zur kostendeckenden Einspeisevergütung** http://www.parlament.ch/ab/frameset/d/n/4715/234002/d_n_4715_234002_234166.htm
- [31] Robert Horbaty, ENCO AG: **The «Smart Energy Network» oder «Interactiv Distribution Energy Network»** http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/00921/index.html?lang=de&dossier_id=01102
- [32] **Global Wind Energy Council GWEC** <http://www.gwec.net>

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM NUKLEARE SICHERHEIT UND ENTSORGUNG

Konstantin Foskolos

konstantin.foskolos@psi.ch



Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS)

Diese neue Einrichtung am PSI ermöglicht die Bestimmung von dünnsten Edelmetallschichten auch auf aktiven Materialien. Auf dem grossen Bild ist eine Gesamtansicht der Anlage vor dem Einbau der Abschirmung zu sehen (vgl. auch Figur 3a). Die Grafik zeigt den Signalverlauf für die Ablation von 3 beschichteten Stahlproben (30, 300, 3000 ng Pt/cm²); die Ergebnisse zeigen generell starke Inhomogenitäten in der Flächenbeladung mit Schwankungsbreiten von ca. einer Grössenordnung.

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 Institutionen sind zudem daran interessiert, dass mittel- und langfristig eine adäquate Anzahl von Nachwuchsspezialisten der Kerntechnik erhalten bleibt, um Verantwortung im Bereich der nuklearen Stromerzeugung zu übernehmen.

Der Wert der nuklearen Energieforschung wird sowohl am PSI als auch innerhalb des ETH-Bereiches anerkannt, und ihr Umfang soll daher stabil gehalten werden. Für die strategische Planung wird weiter angenommen, dass heutige Reaktoren durch neue, mit den Nachhaltigkeitsgeboten noch kompatiblere, ersetzt werden könnten, und dass ein Lager für radioaktive Abfälle in der Schweiz gebaut werden soll. Die erforderliche hohe Flexibilität und Robustheit der Forschung werden durch Arbeiten auf generischen Gebieten, durch Verstärkung der Vernetzung innerhalb des PSI und durch Aufnahme neuer Hauptaktivitäten im Rahmen internationaler Zusammenarbeiten sichergestellt.

Die strategischen Arbeitsgebiete des NES umfassen daher folgende Hauptpunkte:

- Beiträge zum sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der existierenden Kernkraftwerke in der Schweiz und zu Sicherheitsnachweisen für die geologische Endlagerung von Abfällen durch Stärkung der wissenschaftlichen Grundlagen in den entsprechenden Gebieten,
- Unterstützung der KKW-Betreiber und der Sicherheitsbehörde und Sicherstellung einer Stand-by-Funktion in Schlüsselgebieten, insb. jene, welche ein Hotlabor benötigen,
- Bereitstellung von Input für Entscheidungen der «Stakeholders»,
- Förderung der Option «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,

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 Separateffekt-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 Wetrkstoffverhalten (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 Kerneinsbauten (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: 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 Ba-

sis 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).

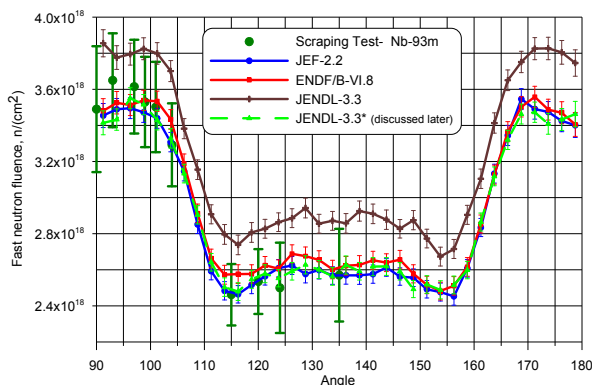
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

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. Im 2006 wurde eine Methodologie für die Berechnung der schnellen Neutronenfluenz (Neutronen-Energie > 1MeV) am Druckgefäß eines Leichtwasser-Reaktors entwickelt: Mit dem weltweit routinemässig für die Kernanalyse verwendeten Codesystem CASMO-4/SIMULATE-3 werden die Neutronenquellen per Brennstab ermittelt; darauf basierend wird der dreidimensionale Neutronenfluss mit Hilfe des Monte-Carlo Codes MCNPX am Druckgefäß berechnet und danach zur Fluenz aufintegriert. Für die Rechengenauigkeit massgeblich ist ein hoher Detaillierungsgrad der Reaktorgeometrie (bis auf Niveau Brennstab), der durch die in MCNPX verfügbare kombinatorische Geometrie erreicht wird. Weiter ist auch die Berücksichtigung der axialen Verteilungen von Neutronen-Quellen und der Moderatortemperatur zwischen Kernumhüllung und Druckgefäß wichtig.



Figur 1: Schnelle Neutronenfluenz (> 1MeV) ermittelt mit Monte-Carlo unter Benutzung von 3 nuklearen Bibliotheken und Vergleich mit den Messdaten der Kratzproben.

Nachdem erste Resultate gut mit den von Kratzproben herrührenden Messdaten übereinstimmen, wurde der Einfluss der standardmässig verfügbaren nuklearen Datenbibliotheken JEF-2.2, ENDF/B-6.8 und JENDL-3.3 auf die Rechengenauigkeit untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die mit den ersten beiden Bibliotheken berechneten Fluenzen gut mit den Messwerten übereinstimmen ($\pm 5\%$), dass aber die JENDL-3.3-Bibliothek um etwa 10% höhere, ausserhalb der Messfehler liegende Resultate lieferte (siehe Figur 1).

Eine detaillierte Untersuchung der Überschätzung ergab, dass sich diese Diskrepanz hauptsächlich

durch eine tiefere Absorption im Wasser, verursacht durch eine unterschätzte (n,α) -Reaktion an ^{16}O erklären lässt. Durch Austausch der (n,α) -Daten mit denjenigen aus ENDF/B-6.8 konnte die erwähnte 10%ige Überschätzung der Fluenz tatsächlich eliminiert werden (siehe grüne Kurve in Figur 1).

Die erreichte hohe Genauigkeit bei der Ermittlung der Neutronenfluenz ist von grosser Bedeutung für die Bewertung der Restlebensdauer von Druckgefässen von Leichtwasserreaktoren.

Diese Arbeiten wurden teilweise durch swissnuclear im Rahmen von ANSR unterstützt.

Human Reliability Analysis (HRA) [2]: Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit und mit Unterstützung der HSK durchgeführt. Die zentralen Themen der HRA-Forschung sind Fehlhandlungen vom Type Error of Commission (EOC) sowie dynamische Szenarioanalysen. Eine Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Technik (im Hinblick auf HRA-Methoden sowie EOC-Identifizierungsergebnissen aus 11 Studien) bestätigt die Stärken der am PSI entwickelten CESA-Methode hinsichtlich Systematik und Effizienz. Im Bereich der dynamischen Analysen erfolgte der Start eines Doktorandenprojekts, die Skizzierung von Handlungsmodellen auf der Grundlage einer begrenzten Anwendung eines Verfahrens zur dynamischen Ereignisanalyse und die Spezifizierung der geplanten Fallstudie durch Auswahl einer bestimmten Variante eines Kühlmittelverluststörfalls.

Die Literaturrecherche umfasste Studien über mögliche Unfallabläufe in KKW, und resultierte in einer strukturierten Zusammenstellung (Tabelle 1) von insgesamt 17 EOC-Fehlhandlungen, die in diesen Studien identifiziert wurden. Quantifizierungen, welche in 16 Fällen vorlagen, wurden ebenfalls untersucht. Um Fehlerursachen möglichst genau zu erfassen, basieren neuere Ansätze – z.B. das am PSI entwickelte Quantifizierungsmodell – auf der Identifizierung von vom Normalfall abweichenden Kontexten (z.B. mit Instrumentierungsfehler). Die Implementierung dieser Ansätze weist jedoch oftmals Schwächen auf, da sie einzelne Kontexte zu stark betont. In dem am PSI entwickelten Quantifizierungsmodell wird dieses Problem mit Hilfe eines Bayes'schen Extrapolationsverfahrens reduziert.

Die Beiträge zu den Fehlerwahrscheinlichkeiten umfassen Faktoren wie konkurrierende Ziele oder Prozedurschritte mit Potentialen für Fehlinterpretationen. Diese Faktoren sind gut durch das Rahmenkonzept, welches zur Identifizierung von Kontexten mit erhöhter Fehlerwahrscheinlichkeit eingesetzt wird, der PSI-Quantifizierungsmethode erfasst. Die Faktoren liefern zudem Hinweise, die existierende Methodenbeschreibung im Hinblick

EOC-Kategorie	Anzahl Fälle	Anzahl vorliegender Quantifizierungen	Zur Fehlerwahrscheinlichkeit beitragende Faktoren (Beispiele)
Beendigung einer automatisch ausgelösten oder normalerweise laufenden Funktion; z.B. <i>Ausschaltung der Sicherheitseinspeisung</i>	10	9	Prozedurschritt mit Potential für Fehlinterpretation Irreführende Störfallvariante Instrumentierungsfehler Konkurrierendes Ziel Komponentenausfall mit Verzögerung Zufallsfehler beim Ablesen oder Interpretieren von Anzeigen
Beendigung einer manuell ausgelösten Funktion; z.B. <i>Stopp des Betriebs von «Feed and Bleed»</i>	2	3 (für einen EOC liegen 2 Quantifizierungen vor)	Instrumentierungsfehler Unvertrautheit mit dem Szenario Konkurrierendes Ziel Zufallsfehler beim Ablesen oder Interpretieren von Anzeigen
Auslösung einer Funktion; z.B. <i>Start einer Reaktorhauptkühlpumpe</i>	4	3	Prozedurschritt mit Potential für Fehlinterpretation Fehlende Prozedur Stress Zufallsfehler beim Ablesen oder Interpretieren von Anzeigen
Inhibierung einer Funktion; z.B. <i>Verhinderung des automatischen Starts des Notspeisewassersystems</i>	1	1	Stereotypisierungsfehler oder versehentliche Schalterbetätigung bei manueller Tätigkeit

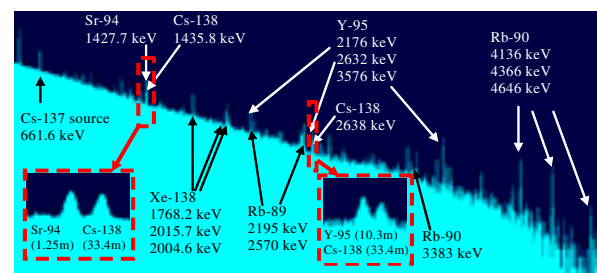
Tabelle 1: Kategorien von Fehlhandlungen vom Typ EOC und beitragende Faktoren.

auf eine Benutzeranleitung auszubauen. Insgesamt ist festzustellen, dass Expertenschätzungen ein wesentlicher Bestandteil von EOC-Quantifizierungen sind, und dass daher Forschungsbedarf besteht, Expertenschätzungen zu reduzieren oder zumindest deren Nachvollziehbarkeit zu erhöhen.

PROTEUS-Experimente [3]: Die Aktivitäten finden mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW statt. Zum Jahresbeginn 2006 wurde das Projekt LWR-PROTEUS beendet und durch das Projekt LIFE@PROTEUS abgelöst. Wie vertraglich vereinbart, wurden die Brennelemente auf diesen Zeitpunkt ins Kernkraftwerk Leibstadt zurücktransportiert und an ihrer Stelle nur noch der PROTEUS eigene Brennstoff (5% angereichertes UO_2) in der Testzone eingesetzt. Die Testzone wurde mit diesem Brennstoff als «Supercritical Water Reactor» (SCWR) konfiguriert, ein zukünftiges Reaktorkonzept, wie es im Rahmen des «Generation IV International Forum» (GIF) angegangen wird. In dieser Konfiguration wurden im Berichtsjahr in einem umfangreichen Programm detaillierte Leistungsverteilungen gemessen. Ein Vergleich der Messungen mit MCNP-Rechnungen ergab eine sehr gute Übereinstimmung und bestätigte damit die Eigenart dieses Gitters, das z.B. wegen seiner heterogenen Moderation mit weniger Brennstäben reaktiver werden kann. Als Vorbereitung für die Messungen im abgebrannten Brennstoff, wie sie nach der Nachrüstung des PROTEUS geplant sind, wurden auch Verteilungen mit alternativen Messmethoden gemessen. Das Hauptproblem bei der Messung von Spaltraten in abgebranntem Brennstoff ist die sehr hohe Untergrundstrahlung,

wie sie in diesen Brennstoffen inhärent vorhanden ist. Daher wurden zwei neue Messmethoden eingesetzt: Messung von verzögerten Neutronen mit Halbwertszeiten < 100 s sowie von kurzlebigen Spaltprodukten mit Halbwertszeiten < 35 Min. Die Idee dabei ist, dass Quellen mit kurzen Halbzzeiten relative hohe Aktivitäten haben und es daher möglich ist, trotz hoher Untergrundstrahlung die im PROTEUS zusätzlich induzierte Aktivität zu messen. Die ersten Resultate zeigen eine gute Übereinstimmung der neuen Methoden mit den früher gemessenen Werten. Ausser im PROTEUS haben wir auch im BR1-Reaktor in Mol versucht, mit der Methode der kurzlebigen Spaltprodukte entsprechende Messungen durchzuführen. Die Experimente in Mol wurden im Rahmen der VENUS-EOLE-PROTEUS Kollaboration durchgeführt.

CMB [4] (Core Materials Behaviour): Das Projekt «Verhalten von Kernmaterialien» findet in



Figur 2: Typisches Gammaspektrum von 4% angereichertem UO_2 mit kurzlebigen Spaltprodukten, wie es im BR1-Reaktor in Mol gemessen wurde (Bestrahlungszeit 15 Min., Messzeit 10 Min., Bleifilter 4 cm).

enger Zusammenarbeit und mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW statt. Die Kontrolle intergranularer Spannungsrisskorrosion (SRK) von Kerneinbauten und Komponenten des Primärsystems ist für Siedewasserreaktoren von grosser Bedeutung. Um der SRK entgegenzuwirken muss das elektrochemische Korrosionspotential der Strukturmaterialien abgesenkt werden. Dies kann mittels Wasserstoffeinspeisung (hydrogen water chemistry, HWC) oder der Anwendung von Edelmetallen (NobleChem™- NMCA, Entwicklung und Patent der General Electric Company) erreicht werden. Die erste Technik unterdrückt die radiolytische Produktion von O_2 und H_2O_2 durch die Zugabe einer genügend grossen Menge von H_2 in das Speisewasser. Diese Technik kann sehr effektiv sein, hat aber den unerwünschten Nebeneffekt, dass die Dosisleistung in den Speisewasserleitungen um einen Faktor 4 bis 5 ansteigt. Bei NMCA wird nur wenig H_2 zugegeben, so dass die unerwünschten Nebenwirkungen der HWC ausbleiben. Dafür werden Edelmetalle (Pt, Rh) in das Speisewasser zugegeben. Die Edelmetalle lagern sich auf den Oberflächen der Einbauten und der Brennstäbe ab, wo sie als Elektrokatalysatoren O_2 und H_2O_2 mit H_2 wirkungsvoll rekombinieren.

Um den Transport und die Verteilung der Edelmetalle innerhalb des Primärkreislaufs zu untersuchen wird eine Analytik benötigt, die kleinste Pt- und Rh-Oberflächenbeladungen mit guter lokaler Auflösung auf einer stark radioaktiven Probe bestimmen kann. Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) kann diese Anforderungen erfüllen. Am PSI wurde im Jahr 2005 ein α - β - γ -abgeschirmtes LA-System in Betrieb genommen, in der hochradioaktive Proben mit einem Laserstrahl lokal abgetragen werden können. Mittels eines Trägergasstromes wird das so ablatierte Material in ein Argon-Plasma geführt, wo es ionisiert wird. Die Ionen werden in einem angeschlossenen Massenspektrometer quantitativ analysiert.

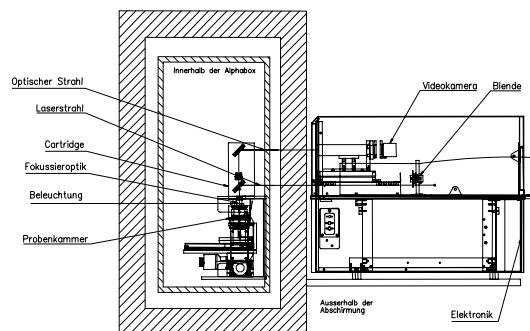
Eine erste Untersuchungsreihe wurde an homogen mit Platin beschichteten Stahlplättchen durchgeführt (Flächenbeladungen mit Platin zwischen 0.003 und 3.0 $\mu g/cm^2$). Platin konnte auf diesen Referenzmaterialien reproduzierbar im gesamten Konzentrationsbereich quantifiziert werden (bei einer lateralen Auflösung von 150 μm). Die Resultate der Analysen an inaktiven Vergleichsproben und aktiven Kerneinbauten aus einem Kernkraftwerk, in welches weltweit erstmals Pt während des Leistungsbetriebs eingespiessen wird, erlauben es, quantitative Aussagen über die Pt-Verteilung im gesamten Primärkreislauf zu treffen.

INTEGER [5] (Bauteilsicherheit): Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit und mit finanzieller Unterstützung der HSK durchgeführt. Im Gegensatz zu neueren Reaktordruckbehältern (RDB), bei welchen die Bedeutung der Materialversprödung als Folge von Neutronenbestrahlung abgenommen hat (geringerer Cu Gehalt), ist diese bei älteren RDBs im Hinblick auf die angestrebte Betriebsdauerverlängerung wieder gestiegen. Die Neutronenversprödung wird mittels im RDB platzierter Voreilproben überwacht. Die Duktil-Sprödbrech-Übergangstemperatur verschiebt sich dabei mit zunehmender Bestrahlung zu höheren Temperaturen hin und stellt ein Mass für den Grad der Neutronenversprödung dar. Die im Reaktorbetrieb bestrahlten Voreilproben werden zur Ermittlung der temperaturabhängigen Kerbschlagenergie in vorgeschriebenen Kerbschlagversuchen zerbrochen und stehen danach leider nur noch bedingt für weitere Untersuchungen zur Verfügung.

Im Rahmen der Suche nach zerstörungsfreien Alterungsüberwachungsmethoden wurde untersucht, ob die Änderung des Seebeck Koeffizienten als Mass für die Materialversprödung als Folge von Neutronenbestrahlung herangezogen werden kann. Gemäss dem von T.J Seebeck im Jahre 1821 entdeckten thermoelektrischen Ef-



Figur 3a: Das abgeschirmte LA-System am PSI.

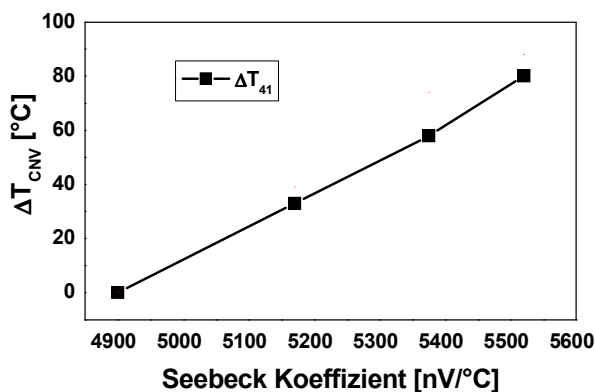


Figur 3b: Schematischer Aufbau der LA-ICP-MS.



Figur 3c: Stahlproben nach der Laser Ablation Analyse (Kratergrössen: ca. 200 μm).

fekt ist ein Temperaturgradient stets von einem elektrischen Strom und einer entsprechenden thermoelektrischen Spannung U begleitet. Technisch wird dieser Effekt genutzt, indem man die Potentialdifferenz U zwischen einer warmen und einer kalten Messstelle mit den entsprechenden Temperaturen (T_1) und (T_2) misst. Der Quotient aus Potential- und Temperaturdifferenz ergibt den Seebeck Koeffizienten $S=U/(T_1-T_2)$ in $nV/^\circ C$, welcher vom Material und dessen Zustand abhängt. Die Schwierigkeit Änderungen von S in der Praxis zu bestimmen, liegt in der Grösse des Effektes. Die zu messenden Thermospannungen liegen je nach Material im Bereich von einigen Mikrovolt und die Änderungen ΔS infolge von mikrostrukturellen Änderungen des Materials betragen wenige hundert nV . Die am PSI mit einem hochpräzisen Gerät ausgemessenen Proben, welche vorgängig mit Neutronenfluenzen von 0 bis 4.5×10^{19} Neutronen/cm² bestrahlt wurden, haben eine mit der Neutronenfluenz monotone Zunahme des Seebeck Koeffizienten von ca. 500 $nV/^\circ C$ ergeben. Figur 4 zeigt, dass der Seebeck Koeffizient im betrachteten Bereich in einer linearen Beziehung zur Verschiebung der Sprödbbruchübergangstemperatur ΔT_{CNV} steht. Dieser Sachverhalt könnte zukünftig eine zerstörungsfreie Bestimmung des RDB-Versprödungszustandes ermöglichen.



Figur 4: Verschiebung der Duktile-Sprödbbruch-Übergangstemperatur ΔT_{CNV} als Funktion des Seebeck-Koeffizienten, gemessen an Charpy Kerbschlagproben aus dem Reaktordruckbehälterstahl JRQ.

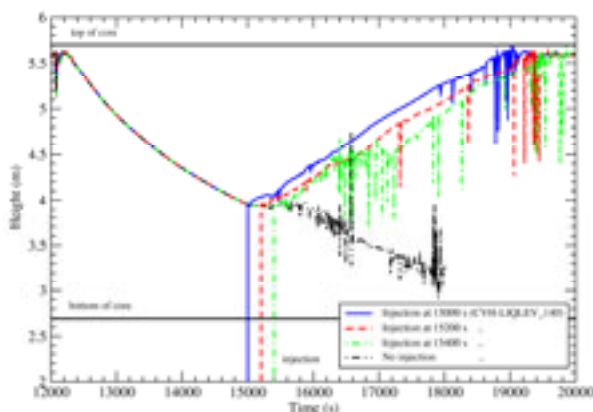
Forschung zu Schweren Unfällen [6]: Die Aktivitäten zu diesem Thema laufen mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW. Nach dem Abschalten eines Druckwasserreaktors (DWR) für die Revision und den Brennelementwechsel wird die Temperatur im Reaktorkühlsystem reduziert und der Druck auf denjenigen im Reaktorsicherheitsbehälter abgesenkt. Anschliessend wird das Wasserinventar soweit reduziert bis die kalten und heissen Stränge in der Höhe noch zirka halb gefüllt sind, was einer Wasserüberdeckung des aktiven Kerns von etwa einen Meter entspricht.

Das Reaktorkühlsystem ist mit dem Sicherheitsbehälter über eine Entlüftungsleitung verbunden und wird mit einem so genannten Restwärmeabfuhrsystem auf einer Temperatur von zirka $50^\circ C$ gehalten. Dazu wird kühleres Wasser in einen der kalten Stränge eingespeist und eine entsprechende, wärmere Wassermenge einem der heissen Stränge entnommen. Mit diesem Prozess ist eine ständige Nachwärmeabfuhr sichergestellt und ein stabiler Zustand im Reaktor garantiert.

Mit dem von der amerikanischen Sicherheitsbehörde (US NRC) zur Analyse von schweren Unfällen entwickelten Rechenprogramm MELCOR wurden die Konsequenzen des Ausfalls dieses Kühlprozesses und die Möglichkeiten die Reaktorkühlung wieder in Gang zu bringen für einen Referenz-DWR von Westinghouse mit einer thermischen Leistung von 1100 MW im Detail analysiert. Dazu wurde der Ausfall des oben beschriebenen Kühlsystems für vier verschiedene Zeiten nach der Reaktorabschaltung (22 bis 600 Stunden) und für drei verschiedene Reaktorbehälterkonfigurationen (oberer Reaktordeckel vollständig entfernt, Reaktordeckel am Platz aber Schrauben gelockert und Reaktordeckel normal montiert) angenommen. Die Analysen charakterisieren einerseits den Unfallverlauf bis zum Versagen des Reaktorbehälters für den Fall, dass die Reaktorkühlung nicht wieder in Gang gebracht werden konnte, und bestimmen andererseits den spätesten möglichen Zeitpunkt für die Inangasetzung einer einzelnen Auffüllpumpe, sodass die Kernaufheizung gestoppt und der Reaktor wieder mit Wasser aufgefüllt werden kann.

Die Mehrzahl der berechneten Unfallcharakteristiken ist wenig von der Reaktorconfiguration abhängig. In allen berechneten Fällen vergehen einige Stunden bis der Wasserpegel unter die Oberkante des aktiven Reaktorkerns sinkt und einige weitere Stunden bis der Reaktorbehälter versagt. Je später der hypothetische Ausfall der Reaktorkühlung angenommen wird, umso länger wird der zeitliche Ablauf des Unfallszenarios. Im Falle einer Kernüberhitzung reichen die Wasserkonzentrationen im Sicherheitsbehälter für eine Verpuffung nicht aus, solange keine Zündquelle vorhanden ist. Hingegen ist eine Verpuffung nach dem Versagen des Reaktorbehälters möglich, wobei die Analyse dieser Unfallsequenz nicht Teil der hier präsentierten Analyse war.

Wie Figur 5 zeigt, reicht gemäss den durchgeführten Analysen eine einzige Auffüllpumpe, die erst nach zirka 15'000 Sekunden in Gang gesetzt wird, nachdem die vorgesehen Reaktorkühlung schon 22 Stunden nach Reaktorabschaltung (limitierendster Fall) ausgefallen ist, um den Reaktorkern wieder mit Wasser aufzufüllen und damit sicher zu kühlen.



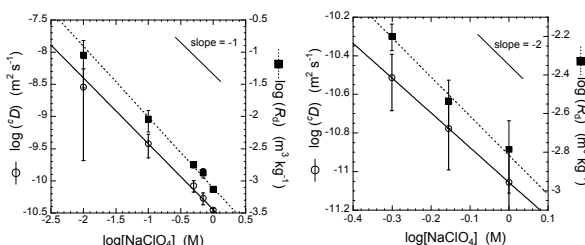
Figur 5: Zeitlicher Verlauf des Wasserpegels im Bereich des Reaktorkerns für drei verschiedene Startzeiten der Auffüllpumpe und für den Fall ohne Einspeisung

Entsorgung Radioaktiver Abfälle [7]: Die F&E zur Entsorgung radioaktiver Abfälle am PSI spielt eine wichtige Rolle auf nationaler Ebene, indem sie die Bundesbehörden und die Nagra bei ihrer Aufgabe zur sicheren Entsorgung der Abfälle der KKW, aber auch aus Anwendungen in der Medizin, der Industrie und der Forschung unterstützt. Kompaktierte Bentonite werden weltweit als Verfüllmaterial bei der Einbettung radioaktiver Abfälle in geologische Tiefenlager vorgesehen. Nebst mechanischen Zwecken dient Bentonit auch als eine Sicherheitsbarriere, indem er den Austritt verschiedenster Radionuklide aus dem Lager stark verzögert. Ein mechanistisches Verständnis der Transportvorgänge in kompaktiertem Bentonit gehört deshalb zur Analyse sicherheitsrelevanter Phänomene bei der geologischen Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle. Montmorillonit, das dominierende Tonmineral in Bentonit, schwillt beim Kontakt mit Wasser stark an und vermag anfangs vorhandene Porenräume in den Lagerstollen abzudichten. Aus diesem Grund konzentriert sich die Forschung über Transportvorgänge in kompaktiertem Bentonit hauptsächlich auf Diffusionsprozesse, d.h. Transportvorgänge, welche allein durch die molekulare Bewegung von gelösten Teilchen in stehenden Flüssigkeiten hervorgerufen werden.

Der Hauptzweck eines am LES laufenden Projekts liegt in der Untersuchung der treibenden Kraft für die Diffusion geladener Teilchen in kompaktierten Tonmineralien. Zu diesem Zweck wurde die Diffusion von radioaktiven Isotopen von Natrium und Strontium (^{22}Na und ^{85}Sr) in Montmorillonit mittels Durchdiffusionstechnik und Profilanalyse untersucht. Ein interessanter Befund dieser Experimenten war die beobachtete Abhängigkeit des Massenflusses der untersuchten Kationen von der Salzkonzentration in der externen Flüssigkeit. In einer logarithmischen Darstellung weist die Abhängigkeit der Diffusionskoeffizienten ($^{\circ}D$) von der Salzkonzentration des externen Mediums

eine Steigung von -1 für ^{22}Na und -2 für ^{85}Sr auf (s. Fig. 6a). Die Figur zeigt ferner, dass dieselbe Abhängigkeit auch für die Verteilung der radioaktiven Isotope zwischen Festkörper und externer Flüssigkeit, charakterisiert durch Sorptions-Verteilungskoeffizienten (R_d), beobachtet wird.

Die beobachtete Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten von der externen Salzkonzentration steht in scheinbarem Widerspruch zu gängigen Porendiffusionsmodellen. Sie kann aber dadurch erklärt werden, dass der diffusionswirksame Gradient nicht nur durch den Konzentrationsunterschied in der externen Wasserphase gebildet wird, sondern dass er infolge der Sorption der diffundierenden Spurenkationen in den so genannten Zwischenschichten des Tons entsprechend der vorherrschenden Salzkonzentration zusätzlich verändert wird. Dies erklärt nicht nur die Abhängigkeit des Massenflusses von der Salzkonzentration, sondern auch die unterschiedlichen Abhängigkeiten für das einfach positiv geladene Natriumkation (Steigung -1) und das zweifach positiv geladene Strontiumkation (Steigung -2). Entgegen klassischer Diffusionsmodelle beeinflusst die Kationensorption am Tonmineral nicht nur die zeitliche Verzögerung des diffundierenden Ions, sondern auch dessen Massenfluss. Nachfolgende Experimente sollen genauer untersuchen, in welchem Kompaktierungsbereich und für welche Typen von Kationen ein solches «Zwischenschicht-Diffusionsmodell» anwendbar ist.



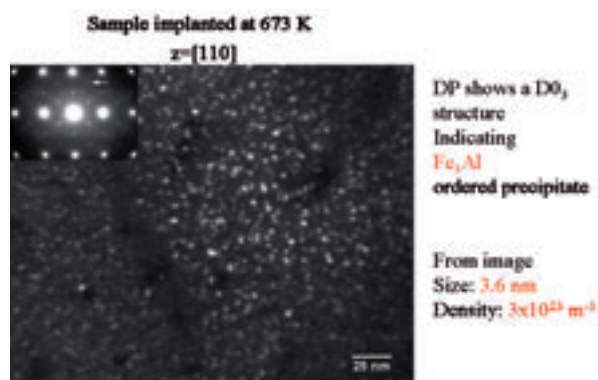
Figur 6: Logarithmische Darstellung der Abhängigkeit von $^{\circ}D$ und R_d für ^{22}Na (links) und ^{85}Sr (rechts) in kompaktiertem Montmorillonit von der Salzkonzentration in der externen Flüssigkeit, welche sich im Kontakt mit der Tonprobe befindet.

SICHERHEITSBEZOGENE MERKMALE ZUKÜNFTIGER REAKTORKONZEPTE

Hochtemperaturmaterialien [8]: Das Projekt findet statt im Rahmen der Schweizer Beteiligung am Generation IV International Forum und ist zudem stark mit Forschungsprojekten des 6. EU-Rahmenprogrammes gekoppelt. Bestrahlung von Werkstoffen mit Neutronen oder Ionen kann ihre Mikrostruktur beeinflussen und damit die mechanischen Eigenschaften verändern. Das Verständnis dieser Änderungen ist für die Abschätzung der Restlebensdauer von hochbelasteten Komponenten

ten in kerntechnischen Anlagen, wie Hochtemperaturreaktoren (HTR) sehr wichtig. Eine äusserst interessante Art von Strahlungseinfluss ist die Ausscheidung von Phasen in Bereichen, wo sie aufgrund der chemischen Zusammensetzung und der Temperatur nicht zu erwarten sind. Häufig wirken solche Phasen durch die von ihnen hervorgerufene Behinderung der Versetzungsbewegung festigkeitssteigernd, was aber gleichzeitig eine Abnahme der Zähigkeit bedeutet (Versprödung). Oxiddispersionsgehärtete (ODS) Legierungen zählen wegen ihrer sehr guten mechanischen Eigenschaften bei Temperaturen über 1000°C zu Kandidaten für Anwendungen in zukünftigen Hochtemperaturreaktoren für Kombianlagen zur Erzeugung von Elektrizität und Prozesswärme. Während eines in-situ Kriechversuchs unter Heliumimplantation bei 400 °C wurde an der ferritischen ODS-Legierung PM2000 (Plansee) festgestellt, dass sich der elektrische Widerstand der Probe im Vergleich zu den Versuchen bei 300°C und bei 500°C in ungewöhnlicher Weise änderte. Nachversuche bestätigten dieses Ergebnis. Anschliessende Untersuchungen der Mikrostruktur im Durchstrahlungselektronenmikroskop (TEM) zeigten die Anwesenheit einer geordneten Fe₃Al-Phase (Figur 7). Wegen des hohen Aluminiumgehaltes in der ferritischen Eisenmatrix ist die Existenz dieser intermetallischen Verbindung durchaus denkbar, jedoch wurde sie ohne Bestrahlung erst bei deutlich höheren Al-Gehalten gefunden. Es ist interessant festzuhalten, dass dieser Effekt weder bei einer Bestrahlungstemperatur von 300°C noch bei einer von 500°C nachgewiesen werden konnte. Weitere Arbeiten sollen Aufschluss über den Einfluss dieser Phase auf die Hochtemperaturfestigkeit von PM2000 liefern.

ALPHA [9]: Das Projekt ist derzeit stark auf das internationale Programm SETH der OECD/ NEA ausgerichtet, woher auch ein grosser Teil seiner



Figur 7: TEM Abbildung einer strahlungsinduzierten intermetallischen Fe₃Al Ausscheidung in der ferritischen ODS-Legierung PM2000. Bestrahlungstemperatur 400°C. TEM Dunkelfeldabbildung mit Überstruktureflex (DP = Beugungsbild, D0₃ = zugeordnete Kristallstruktur).

Finanzierung kommt. Das Projekt befasst sich mit experimentellen Untersuchungen von Phänomenen im Zusammenhang mit Gasströmungen und -verteilungen in nuklearen Reaktorsicherheitsbehältern mit einem speziellen Augenmerk auf die Wasserstoffproblematik. Das konkrete Projektziel war die Generierung einer adäquaten experimentellen Datenbasis für die Weiterentwicklung und Validierung von fortgeschrittenen thermohydraulischen Simulationsprogrammen für eine Verbesserung von Reaktorsicherheitsanalysen, Unfallmanagement und Auslegung von Unfallmassnahmen.

Das Potential von fortgeschrittenen dreidimensionalen Simulationsprogrammen (CFD (Computational Fluid Dynamics)-, spezialisierte Sicherheitsbehälter- und Systemanalysecodes) zur detaillierteren Abklärung von Sicherheitsfragen sowohl von heutigen wie auch von zukünftigen, fortgeschrittenen Reaktoren (Generationen III, III+ und IV) wurde durch verschiedene internationale Expertengruppen identifiziert, und ist eine der grossen zukünftigen Herausforderungen. Die dazu benötigten, gegenüber den heutigen Simulationswerkzeugen wesentlich erhöhten, Anforderungen an die Rechen- und Speicherkapazitäten werden durch die ständigen Verbesserungen der Leistungsfähigkeit moderner Computer kontinuierlich besser ermöglicht oder überhaupt erst möglich gemacht.

Verbesserte und vor allem auch genauere Simulationen werden sowohl für existierende (z.B. hinsichtlich von Leistungserhöhungen, von Unfallmanagementprozeduren etc.) wie auch zum Sicherheitsnachweis von neuartigen zukünftigen Reaktoren benötigt. Im Rahmen der Thermohydraulik des Sicherheitsbehälters wurden in einem ersten Schritt, grundlegende Phänomene, die bei postulierten Unfällen eine wichtige Rolle spielen, im Detail untersucht. Um die Validierungsbedürfnisse der fortgeschrittenen Simulationsmethoden zu befriedigen, wurden in PANDA zum Teil erstmalig, insbesondere bezüglich Orts- und Zeitauflösung, fortgeschrittene Messsysteme eingesetzt wie zum Beispiel PIV (Particle Image Velocimetry) zur Messung von Gasgeschwindigkeitsfeldern. Damit konnte eine einzigartige experimentelle Datenbasis erarbeitet werden für typische Phänomene und Prozesse im Sicherheitsbehälter wie Stratifizierungen, Gastransport zwischen grossen Räumen, Kondensation an Wänden und Einbauten unter dem Einfluss von Gas- und Dampfstrahlen.

Auf Figur 8 sind beispielhaft gerechnete Geschwindigkeitsfelder und experimentelle Temperaturverteilungen im Sicherheitsbehälter eines Reaktors verursacht durch die generische Simulation eines Lecks im Primärkreis dargestellt: ein heisser Dampfstrahl wird in einen kalten grossen Behälter eingespiesen und verursacht auch eine Strömung in den zweiten Behälter.

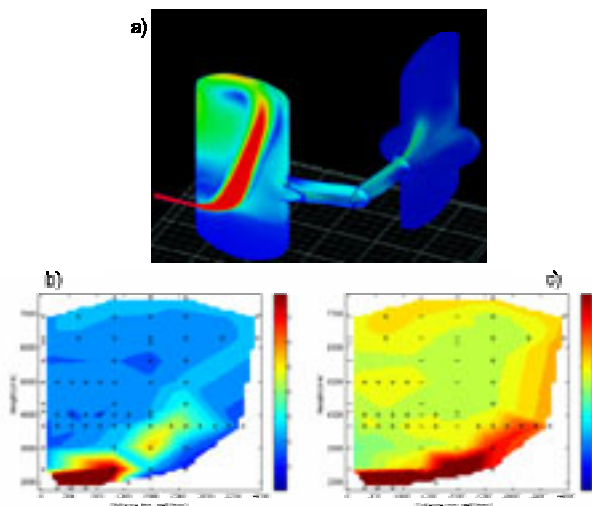


Figure 8: a) Simulation des Strömungsfelds für ein PANDA Experiment mit dem fortgeschrittenen Sicherheitsbehältercode GOTHIC: Einspeisung mit hoher Geschwindigkeit (rot) und Verteilung in den grossen Behältern (2 mal 90 m³); b) und c) Experimentelle Temperaturverteilung dargestellt in einer Ebene: b) am Anfang erfolgt die Einspeisung mit höherer Temperatur (rot) in den kalten Behälter (blau); c) im weiteren Verlauf des Experiments wird das Gas im Behälter aufgeheizt.

FAST [10]: Das Projekt findet im Rahmen der Schweizer Beteiligung am Generation IV International Forum statt. Getrieben durch die erhöhten Anforderungen bezüglich Sicherheitsbeurteilung fortgeschrittener Reaktorsysteme, hat das Projekt u.a. die Referenzauslegung für den Brennstoff des Gas-cooled Fast Reactor (GFR) der 4. Generation untersucht. Dieser Brennstoff unterscheidet sich wesentlich von herkömmlichen Brennstoffstäben, nicht nur bezüglich Materialien (Uran-Plutonium-Mischkarbid in einer Siliziumkarbid-Matrix), aber auch hinsichtlich Brennelement-Geometrie und -Anordnung. Die zylindrischen Brennstoffpellets von einigen mm Höhe und Durchmesser sind innerhalb einer Wabenstruktur angeordnet, wobei jedes Pellet eine Zelle belegt. Dieses Gitter wird beidseitig von Wänden von etwa 1 mm Dicke bedeckt (Figur 9a).

Weil eine detaillierte thermomechanische Transientenanalyse (z. B. mittels eines Finiteelemente-Modells) des ganzen Kerns oder auch eines einzigen Brennelementes ausserordentlich zeitintensiv wäre, wurde der Bedarf an einer vereinfachten und raschen Rechenprozedur klar identifiziert. Die Codes TRAC/AAA (System-Thermohydraulik) und FRED (Thermomechanik des Brennstoffstabes), die schon früher im Rahmen des Codesystems FAST des PSI für die Transientenanalyse konventionellen Brennstoffs für schnelle Reaktoren gekoppelt wurden, bildeten die Basis für die aktuellen Entwicklungen. Es wurde ein zweidimensionaler Ansatz für die Simu-

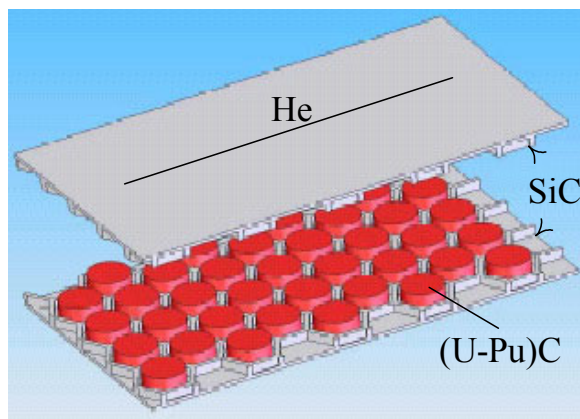


Figure 9a: GFR Brennelement (Platte).

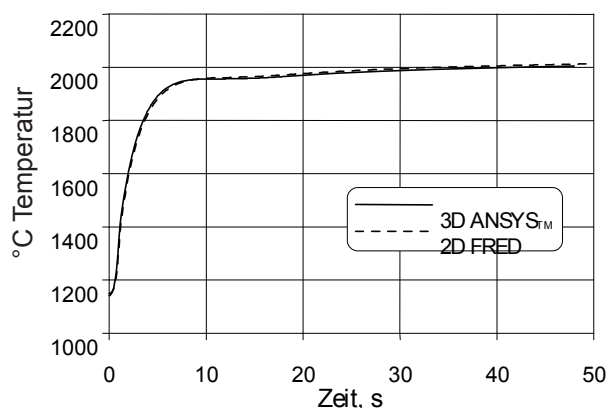


Figure 9b: Spitzen-Brennstofftemperaturen während eines UTOP-Unfalls berechnet mit den Modellen FRED (2D) und ANSYSTM (3D).

lation des thermischen Verhaltens eines solchen Brennstoffes (sowohl für die stationäre als auch die Transientenanalyse) unter Berücksichtigung der inneren Heterogenität entwickelt und gegen detaillierte dreidimensionale Finiteelemente-Analysen mit dem Code ANSYSTM (für ein Brennstoffpellet) getestet. Das somit erhaltene zweidimensionale Modell kann detaillierte Brennstoff- und Matrixtemperaturen liefern, die zur Bestimmung der Neutronik-Rückkopplung als auch zur Evaluation der Brennstoffintegrität eingesetzt werden können. In diesem Rahmen wurde eine Reihe von Studien durchgeführt, einschliesslich Vergleiche verschiedener Gasspalt-Modelle, stationärer Temperaturverteilungen in Oxiden und Karbiden und von Resultaten für eine Demonstration einer Transientenrechnung (Figur 9b).

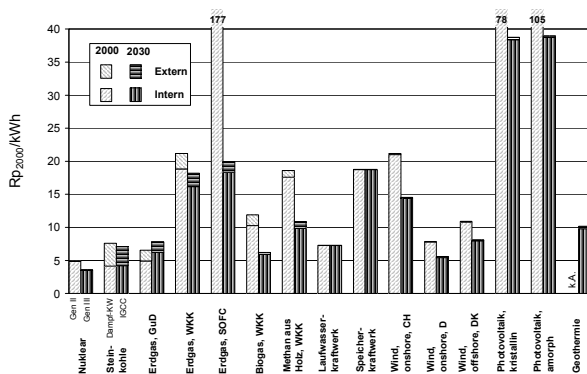
GANZHEITLICHE BETRACHTUNG VON ENERGIESYSTEMEN

Technologie-Bewertung (GaBE) [11]: Im Jahr 2006 schloss GaBE den Beitrag zum Projekt «Nachhaltigkeit» der Axpo ab. Ziel des Projekts war die interdisziplinäre Bewertung einer breiten

Palette von Stromerzeugungstechnologien (nuklear, fossil und erneuerbar), und zwar jeweils für heutige, wie auch für zukünftige Optionen zur Schweizer Stromversorgung. Der Zeithorizont der untersuchten Technologieentwicklung erstreckte sich bis zum Jahr 2030. Das Projekt wurde von Axpo geleitet und in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart, CEPE und BAK durchgeführt.

In den Bereichen Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft wurden 75 Kriterien definiert und für alle Technologien für die Jahre 2000 und 2030 quantifiziert. Neben der Definition und Modellierung der Referenztechnologien und zugehörigen Brennstoffketten war das PSI für den gesamten Bereich Ökologie sowie für zahlreiche soziale und ökonomische Kriterien verantwortlich. Ökologische Kriterien umfassten u.a. Treibhausgasemissionen, Verbrauch an fossilen Ressourcen und Uran sowie Schäden an Ökosystemen und radioaktive Abfälle. GaBE-Beiträge zu den ökonomischen und sozialen Kriterien waren u.a. die Ermittlung von Stromgestehungskosten bzw. Schäden für die menschliche Gesundheit im Normalbetrieb und als Folge von schweren Unfällen. Die Basis für die ökologischen Kriterien bilden Lebenszyklusanalysen (LCA) der Energieketten inkl. Referenzszenario für 2030. Die Quantifizierung der Gesundheits- und Umweltschäden beruht auf standortspezifischem Impact Assessment.

Ein möglicher aggregierter Indikator zur Nachhaltigkeitsbewertung, der im Rahmen dieses Projekts ermittelt wurde, sind die Vollkosten (interne Produktionskosten + externe Kosten aus Gesundheits- und Umweltschäden, Figur 10). Die geringsten Vollkosten weist heute wie 2030 die Kernenergie auf. Erneuerbare werden bis 2030 mit Ausnahme der Wasserkraft deutlich günstiger und damit teilweise konkurrenzfähig. Die Berücksichtigung der für Erneuerbare und Kernenergie sehr geringen externen Kosten erhöht die Wett-



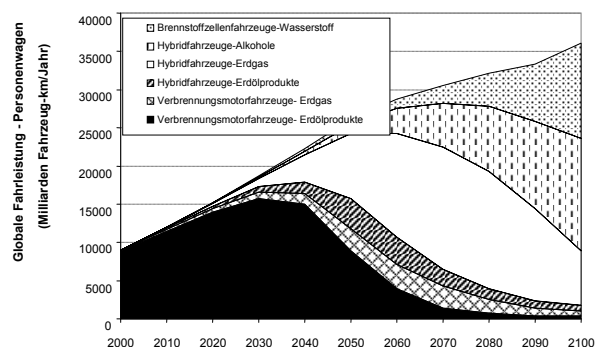
Figur 10: Vollkosten der Stromerzeugung – Vergleich von nuklearen, fossilen und erneuerbaren Energiesystemen 2000 und 2030 (Gen II/III = Reaktor der Generation II bzw. III; IGCC = Kraftwerk mit integrierter Kohlevergasung; GuD = Gas- und Dampfkraftwerk; WKK = Wärmekraftkopplung; SOFC = Solid Oxide Fuel Cell).

bewerbsfähigkeit der Erneuerbaren gegenüber fossilen Kraftwerken. Die externen Kosten werden – vor allem bei fossilen Energien – von den Kosten des Klimawandels, d.h. von Treibhausgasemissionen dominiert. Die Quantifizierung dieser Externalitäten ist jedoch auch mit den grössten Unsicherheiten verbunden.

Zur alternativen Quantifizierung eines Nachhaltigkeits-Indikators wurde ein Modell entwickelt, das auf der Methode der «Multi-Criteria-Decision-Analysis» (MCDA) basiert. Das vollständige MCDA-Modell ermöglicht auch die Berücksichtigung von nicht monetär quantifizierbaren Kriterien, insbesondere von weiteren sozialen Faktoren, und durch die Gewichtung der einzelnen Kriterien auch die Berücksichtigung individueller bzw. Gruppen-Präferenzen.

Energieökonomie [12]: Die Energiewirtschaftsgruppe befasst sich mit der Entwicklung von langfristigen Zukunftsszenarien des Energiesystems, welche für die Klima- oder Energiepolitik relevant sind. Ein Schwerpunkt unserer Arbeit ist die Beurteilung von Erfolg versprechenden Strategien für alternative Energietechnologien und begleitenden politischen Instrumenten.

Die Auswirkungen des Transportsystems stellen eine signifikante Bedrohung der langfristigen Nachhaltigen Entwicklung dar. Insbesondere ist der Verkehrssektor einer der am schnellsten wachsenden Energieverbraucher und Quellen von Treibhausgasemissionen. Darüber hinaus hängt das Transportsystem (im speziellen Strassenverkehr und Automobilverkehr) stark vom Erdöl ab, dessen Ressourcen nur beschränkt verfügbar und ausserdem mit geopolitischen Risiken verknüpft sind.



Figur 11: Entwicklung der globalen Fahrleistung von Personenwagen im 21. Jahrhundert.

Mit einem globalen Energiesystemmodell wurden die Bedingungen untersucht, bei denen wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge eine langfristige Rolle im globalen Automobilsektor spielen könnten. Die Energiewirtschaftsgruppe hat in Zusammenarbeit mit IIASA ein Szenario ent-

wickelt, das folgende Bedingungen erfüllt: 1) Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bleibt unter 550 ppmv und 2) Energiesicherheits-Massnahmen werden getroffen, welche die Verfügbarkeit der bestehenden Erdölressourcen verlängern.

Die Resultate zeigen, dass in einem solchen Szenario Hybridfahrzeuge den Hauptanteil des glo-

balen Personenwagenverkehrs übernehmen würden. In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts würden zudem Brennstoffzellenfahrzeuge eine wichtige komplementäre Rolle spielen, vorausgesetzt, dass Wasserstoff CO₂-frei erzeugt werden kann.

Nationale Zusammenarbeit

Je nach Thematik werden die Arbeiten in enger Zusammenarbeit mit den Betreibern der Schweizer Kernkraftwerke und oder 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 2006 und Ausblick 2007

Die Ziele aller Projekte wurden im Jahr 2006 erfüllt. Besonders hervorzuheben ist die Unterzeichnung mehrerer Zusammenarbeitsverträge mit der HSK auf dem Gebiet der Material- und Sicherheitsforschung an. Sie stellen eine Fortsetzung der bisherigen Aktivitäten STARS, RIKORR, DIAGNOSTIK und HRA dar. Für die Projekte HT-MAT und FAST wurden Verträge auf Systemebene mit den GIF-Partnern abgeschlossen. Mit den Betreibern der KKW wurden langfristige Verträge für den Betrieb der Reaktorschule und für die Unterstützung des Hotlabor-Betriebs am PSI unterzeichnet.

Die Vorbereitungsarbeiten für die Nachrüstung des Nullleistungsreaktors PROTEUS wurden mit der Verfassung eines sehr detaillierten Antrags an die Sicherheitsbehörden vorangetrieben; dieser

wird Anfang 2007 eingereicht. Aufgrund der Erkenntnisse des SETH-Projekts und der Notwendigkeit, experimentelle Untersuchungen mit der Kombination verschiedener Phänomene für die Validierung der Simulationswerkzeuge durchzuführen, wurde ein Vorschlag für ein Fortsetzungsprojekt erarbeitet. Die Mehrheit der Partner hat bereits ihre Unterstützung für das neue Projekt zugesagt und dessen Beginn ist im Frühling 2007 geplant.

Mit der Veröffentlichung des 1. Calls für Vorschläge betreffend Projekte innerhalb des 7. EU-Rahmenprogrammes wird die Durchführung wichtiger internationaler Zusammenarbeiten im Rahmen der Euratom eingeleitet; im 2007 werden zahlreiche solche Vorschläge erarbeitet.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden.

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

- [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] Ch. Hellwig (christian.hellwig@psi.ch), PSI, Villigen, CMB, http://lww.web.psi.ch/lww/projects_cms.shtml, (JB)
- [5] H.P. Seifert, (hanspeter.seifert@psi.ch), PSI, Villigen, INTEGER, http://lww.web.psi.ch/lww/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, http://lww.web.psi.ch/lww/projects_htm.shtml, (JB)
- [9] M. Huggenberger, J. Dreier, F. de Cachard (joerg.dreier@psi.ch), PSI, Villigen, ALPHA, <http://lth.web.psi.ch/LTH.htm>, (JB)
- [10] P. Coddington (paul.coddington@psi.ch), PSI, Villigen, FAST, (JB)
- [11] St. Hirschberg (stefan.hirschberg@psi.ch), PSI, Villigen, GaBE, <http://gabe.web.psi.ch>, (JB)
- [12] L. Barreto (leonardo.barreto@psi.ch), PSI, Villigen, Energieökonomie, <http://energyeconomics.web.psi.ch/>, (JB)

PROGRAMM REGULATORISCHE SICHERHEITSFORSCHUNG

Thomas Bigler

Thomas.Bigler@hsk.ch



Aerosol-Rückhaltung in einem Dampferzeuger

*Oberer Teil der Teststrecke mit montiertem Tropfenabscheider- und Dampftrockner-Modul
(Quelle: PSI).*

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 Kommandoraum von Kernkraftwerken.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

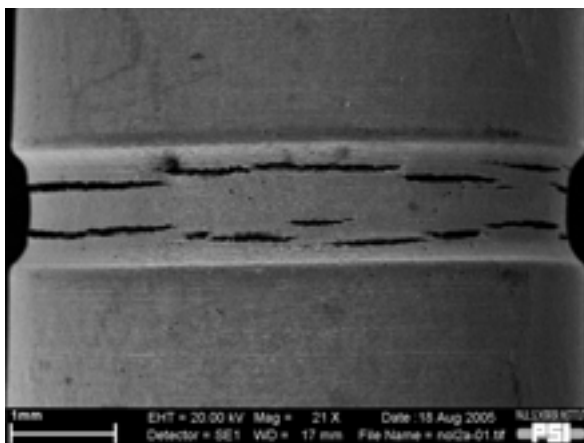
REAKTORSICHERHEIT

KORA – Environmentally-Assisted Cracking in Austenitic LWR Structural Materials [1]: Spannungsrisskorrosion ist ein komplexer und oft bedrohlicher Alterungs- und Schädigungsmechanismus. Spannungsrisskorrosion findet dann statt, wenn anfällige Werkstoffe in einer aggressiven Umgebung mechanisch belastet werden. Hierbei wird überwiegend zeitunabhängige, konstante Spannung unterstellt, welche auch von Schweisseigenspannungen herrühren kann. Die Schwingrisskorrosion ist eine weitere Form des umgebungsbedingten Risswachstums, welche bei mechanischer Wechselbelastung auftreten kann. Unter ungünstigen Umständen können sich bei gleichzeitigem Vorliegen von anfälligem Werkstoff, aggressiver Umgebung und mechanischer Zugspannung schnelle, verzweigte und oft nur schwer zu erkennende Risse ausbreiten und insbesondere druckführende Komponenten wie Rohrleitungen und Behälter beschädigen.

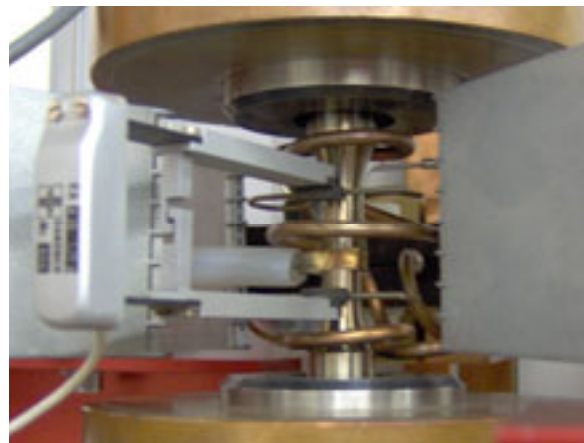
Es ist daher von grosser Wichtigkeit, die genauen Umstände, unter denen solche Risse wachsen können, zu kennen und wo immer möglich zu vermeiden. Da es jedoch in der Praxis nicht immer möglich ist, diese Umstände gänzlich auszuschliessen, ist es darüber hinaus wichtig zu wissen, welche Komponenten eines Kernkraftwerkes potenziell gefährdet sind und diese entsprechend häufig und gründlich zu inspizieren.

Das im Januar der Berichtsperiode begonnene Projekt besteht aus drei Teilen:

- Das *Teilprojekt I* befasst sich mit der experimentellen Charakterisierung der Risskorrosion in austenitisch rostfreien Stählen bei Ermüdungsbeanspruchung. Die Ziele, namentlich die Materialbeschaffung und Charakterisierung, die Wärmebehandlung sowie die Probenherstellung und Präparierung wurden für die Berichtsperiode erreicht und es konnten bereits erste Resultate der Korrosionsermü-



Figur 1: Spannungsrissskorrosions-Risse in gekerbter Rundzugprobe aus rostfreiem Stahl (Quelle: PSI).



Figur 2: Versuchseinrichtung für thermomechanische Ermüdung (Quelle: PSI).

derung an austenitischen Stählen gemessen werden (Fig.1).

- Im Rahmen des *Teilprojektes II* wird das Potential von elektrochemischen Rauschmessungen zur Detektierung der SpRK-Initiierung und Früherkennung der Risskorrosion untersucht. Der Aufbau neuer Versuchsanlagen und die Durchführung erster Tests wurden erreicht.
- Das *Teilprojekt III* umfasst zwei kleinere, weiterlaufende internationale Aktivitäten aus dem RIKORR-II-Projekt, die in den BFE-Jahresberichten 2003 und 2004 genauer beschrieben sind: *Alloy 182 Round Robin* (ICG-EAC) und *Alloy 182/RDB-Stahl-Mischnaht* (Tohoku-Universität). Die Ringversuche und die Untersuchungen an Alloy 182 Mischschweisnähten unter Siedewasserbedingungen sind angelaufen.

DIAGNOSTIK-II – Monitoring of Thermomechanical Fatigue and RPV Embrittlement due to Neutron Irradiation [2]: Der Projektteil «*Bewertung und Früherkennung von Thermomechanischer Ermüdung nicht rostender Stahlkomponenten auf der Basis von Mikrorissbildung und –wachstum*» befasst sich mit der Entwicklung einer neuen Früherkennungsmethodik im Bereich der Ermüdung. Heute werden in der Aufsichtspraxis eine Reihe von zerstörungsfreien Prüfmethoden, wie etwa Ultraschall-, Wirbelstrom-, und Durchstrahlungsprüfungen sowie visuelle Inspektionen angewendet. Ihnen allen ist jedoch gemeinsam, dass damit erst Risse ab etwa 1mm erkannt werden können. Eine Methode, welche bereits vor Eintreten solcher technischen Risse einen Hinweis auf den Zustand von Komponenten geben kann, bringt einen erheblichen Sicherheitsgewinn. Die Einrichtung und die Erprobung einer thermomechanischen Versuchsanlage (Fig. 2), die Beschaffung, die Charakterisierung und erste Prüfungen von Probenmaterial, die Wahl und Va-

lidierung eines theoretischen Ermüdungsmodells, die Detektierbarkeit von Kurzrissen und die Evaluation mikroelektrischer Kenngrößen wurden als Projektziele erreicht.

Der Projektteil «*Bestimmung der RDB-Versprödung infolge von Neutronenbestrahlung mittels Seebeck-Koeffizient und mikromagnetischer Kenngrößen*» befasst sich mit der Entwicklung einer neuen Früherkennungsmethodik im Bereich der Reaktordruckbehälterversprödung. Der Versprödungsgrad wird heute dadurch bestimmt, dass Bestrahlungsprobensätze (Voreilproben) während des Betriebes im RDB eingelassen werden und dann in bestimmten Zeitintervallen ausgebaut und geprüft werden. Da die Anzahl solcher Probensätze jedoch begrenzt ist und diese bei der Prüfung zerstört werden, bringt eine Methode, mit welcher man fortlaufend die Versprödung am RDB selbst messen oder die Voreilproben nach der zerstörungsfreien Messung wieder in den RDB einlassen kann, ebenfalls einen deutlichen Sicherheitsgewinn. Bisheriges Ergebnis: Die Einrichtung und die Erprobung einer Messapparatur zur Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten und die Auswertung erster Referenzprobensätze wurden erreicht. Dabei zeigte sich jedoch zunächst eine sehr grosse Streuung der Messresultate, welche gemäss dem Projektbericht von zu wenig präparierten Probenoberflächen hervorgerufen sein könnte.

STARS-V - Safety Research in Relation to Transient Analysis for the Reactors in Switzerland [3]: Die Aufgabe des STARS Projekts ist 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 auslegungsüberschreitenden Störfällen (Sicherheitsebene 4 bis zum evtl. Kernschmelzen) ein.

Die Schwerpunkte bei den Projektzielen für das Jahr 2006 wurden wie folgt umgesetzt:

- **Abschätzung von Rechenunsicherheiten:** Im Rahmen des Projekts BEMUSE III wurden verschiedene Methoden zur Unsicherheitsanalyse eines Tests zu einem Kühlmittelverluststörfall verglichen. Die Ergebnisse der vom PSI entwickelten Methode lagen im gleichen Bereich wie diejenigen der anderen Projektteilnehmer. In einer Doktorarbeit wurde die Methodik zur Unsicherheitsanalyse weiterentwickelt und auf Anlagetransienten angewendet.
- **Modellierung des Brennstoff- und Brennstabverhaltens:** Die STARS-Gruppe analysierte ein Experiment des Halden Reactor Projekts zu einem Kühlmittelverluststörfall, bei dem die axiale Umverlagerung des Brennstoffs aufgrund von Aufblähen des Hüllrohres in radialer Richtung unter Temperatur- und Innendruckeinfluss («ballooning») abgeschätzt wird. Der erste Versuch in Halden, der zunächst nicht zum «ballooning» führte, wurde wiederholt und hatte im zweiten Anlauf Erfolg. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigten eine vernünftige Genauigkeit im Vergleich mit den Versuchsergebnissen.

Es wurden ausserdem neuere Ergebnisse von Spaltgasfreisetzungsmessungen an modernen Brennstäben von Siedewasserreaktoren nachgerechnet. Dazu wurde das Programm mit einem selbstentwickelten Spaltgasfreisetzungsmodell gekoppelt. Weiter wurden Nachrechnungen für ausgewählte Versuche zum Reaktivitätsstörfall durchgeführt.

- **Analysen von Kritikalität und Neutronenfluenz:** Mit der Entwicklung einer Methode zur Durchführung von Kritikalitätsberechnungen für Kompaktlager und für Transportbehälter sollen die Forderungen generell akzeptierter Standards nachgewiesen werden. Für das KKG wurden zudem Berechnungen zur Neutronenfluenz im Reaktordruckbehälter durchgeführt, die im Rahmen der Alterung und Betriebsdauerverlängerung bei Kernkraftwerken allgemein von Bedeutung sind. Ein Vergleich mit sog. Scraping Test Daten ergaben gute Übereinstimmungen.
- **Thermohydraulische Analysen:** Mit einem 3D-thermohydraulischen Programm wurden Nachrechnungen von ausgewählten Tests (Borverdünnung während Kühlmittelverluststörfällen und Ausfall der Nachkühlung) sowie Untersuchung von thermohydraulischen Phänomenen während eines kleinen Lecks in einem Druckwasserreaktor) durchgeführt.

Darüber hinaus beteiligte sich das STARS-Team am europäischen Projekt NURESIM, in dessen Rahmen eine Softwareplattform zur Nutzung unterschiedlichster nuklearer Simulationsprogramme entwickelt und angewendet wird.

OECD Halden Reactor Project (HRP) – Fuels and Materials [4]: An diesem Projekt beteiligen sich 18 Länder und mehr als 100 Organisationen. 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 ihrer 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 PSI, den Schweizer KKW-Betreibern und der HSK. Über das Schweizer Halden Komitee (SHK) 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 «Halden Programme Group» (HPG: verantwortlich für die technisch-wissenschaftliche Steuerung des Programms) und «Halden Board of Management» (Halden Board: verantwortlich für die Strategie des Programms) wieder ins Projekt ein. Im Jahre 2006 hat die HSK nach längerer Pause wieder eine junge Wissenschaftlerin nach Halden delegiert.

Die Experimente in «Instrumented Fuel Assemblies» (IFA), die in den Forschungsreaktor eingesetzt sind, zielen auf die Messung von Kenngrössen von keramischen Brennstoffen (UO_2 , UO_2 mit Additiven, $(\text{U,Gd})\text{O}_2$, MOX) und von Hüllrohrmaterialien bezüglich ihres Betriebsverhaltens bei hohem Abbrand.

Anlässlich eines MOX-Workshops wurden die Ergebnisse und Untersuchungen an Uran-Plutoniummischoxid zusammengefasst und künftige Fragestellungen formuliert, die in Experimenten geklärt werden sollen.

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.

In der viel beachteten Serie von LOCA (Loss of Coolant Accident)-Versuchen an Hochabbrandbrennstoffen aus kommerziellen Reaktoren wurden die ersten Tests bei 800 °C und 1150 °C durchgeführt. Die erhaltenen Resultate ergeben noch kein schlüssiges Bild, jedoch wurden wertvolle Daten für die Modellierung erhalten.

Entworfen und ausgelegt wurde ein vergleichender Versuch zum Verhalten von kommerziellen Druckwasserreaktor-Hüllrohren unter hohen Lithium Konzentrationen. Der Versuch wird im nächsten Jahr in den Reaktor eingesetzt. Weitere Themen zu denen Beschreibungen von neuen Experimenten (White Papers) vorliegen, sind Brennstoffkriechen, Hüllrohrkriechen und ein Versuch zur Beeinflussung eines Brennstabes mit starker Crud-Belegung. Zudem wurde in Zusammenarbeit mit Studsvik Nuclear eine Testeinrichtung für Leistungstransienten ausgelegt und gebaut.

MSWI – Melt-Structure-Water Interactions during Severe Accidents in LWR [5]: Das Programm MSWI (übersetzt: «Schmelze-Struktur-Wasser-Wechselwirkung») wird von der schwedischen Königlich-Technischen Hochschule (KTH) in Stockholm durchgeführt und untersucht den Ablauf und die möglichen Massnahmen bei schweren Reaktorunfällen. Neben der HSK fördern als weitere Partner die schwedische Sicherheitsbehörde (SKI), schwedische Kraftwerksbetreiber sowie die EU (SARNET-Programm) die Projektarbeiten. Seit dem 01.01.1996, dem Beginn ihrer Teilnahme an diesem Programm, kann die HSK direkt auf alle erarbeiteten Resultate zugreifen und hat die Möglichkeit, die Forschungsziele mitzubestimmen.

Die MSWI-Projektarbeiten im Jahre 2006 behandelten sowohl so genannte *in-vessel*- wie auch *ex-vessel*-Phänomene (d.h. Vorgänge vor, bzw. nach dem Versagen des Reaktordruckbehälters - RDB). Das übergeordnete Projektziel bestand darin, das Verständnis der bei einem Schwerunfall ablaufenden Prozesse zu verbessern und entsprechende Unsicherheiten zu reduzieren. Konkret wurden im Wesentlichen folgende Arbeiten geplant und durchgeführt:

- Entwicklung von numerischen Modellen zur Berechnung des Wärmetransports in der Kernschmelze vor RDB-Versagen;
- Numerische Untersuchung zur Kühlbarkeit der Schmelze mittels Steuerstabantriebskühlung;
- Experimente zur Bildung einer Schmelzpartikelschüttung (nach RDB-Versagen);
- Entwicklung eines numerischen Modells zur Untersuchung der Kühlbarkeit einer von unten durchströmten Partikelschüttung im Naturumlauf (Zirkulation des Wassers durch Dampfbildung);
- Durchführung von 2D-Rechnungen zur Untersuchung des Einflusses der Inhomogenität einer Partikelschüttung auf deren Kühlbarkeit.

Gegenüber den Vorjahren standen 2006 vor allem die analytischen / theoretischen Arbeiten im Vordergrund, in deren Rahmen insbesondere verschiedene CFD (*Computational Fluid Dyna-*

mics)-Modelle entwickelt wurden. Die Validierung der Computermodelle erfolgte anhand der heute international vorliegenden experimentellen Daten und gesicherten Erkenntnisse.

Die wichtigsten experimentellen Arbeiten wurden im DEFOR (*Debris Bed Formation*)-Programm durchgeführt. Untersucht wurden dabei primär die Eigenschaften der Partikelschüttung, welche sich nach der Wechselwirkung eines Kernschmelzestrahls mit unterkühltem Wasser ausbildet.

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 besonders 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 Berichterstattungszeitraum hat das PSI:

- die für die Bereitstellung des Modells für die Zircaloyoxidation relevanten physikalischen Phänomene studiert und im Jahresbericht beschrieben;
- die für die Validierung des Zircaloyoxidation Moduls relevanten Daten aus Experimenten und aus dem Unfall im Kraftwerk Three Mile Island gesammelt, zusammengestellt und im Jahresbericht beschrieben.

Am jährlichen HSK-Workshop für Schweizer Benutzer von Rechencodes zur Modellierung schwerer Unfälle hat das PSI seine Arbeit im Rahmen dieses Projektes interessierten Kreisen der HSK, der ETH und der Kernkraftwerksbetreiber präsentiert. Bei dieser Gelegenheit hat das PSI die wichtigsten internationalen Erkenntnisse betreffend Weiterentwicklung von MELCOR den Schweizer MELCOR-Benutzern weitervermittelt.

OECD MCCI – Melt Coolability and Concrete Interaction [7]: Unter dem Projekttitel OECD-MCCI

(Melt Coolability and Concrete Interaction) werden am Argonne National Laboratory in Chicago (USA) Versuche zur Kühlbarkeit von Kernschmelze (Corium) und der Wechselwirkung zwischen Kernschmelze und Beton durchgeführt. Das Projekt und dessen Nachfolger OECD-MCCI-2 liefern wertvolle Erkenntnisse über das Verhalten von Kernschmelze, die bei einem schweren Unfall aus dem Reaktordruckgefäß auf den Betonboden der Reaktorgrube fällt. Diese Erkenntnisse können in die «*Severe Accident Management Guidance*» (SAMG) einfließen. Damit können bei einem schweren Unfall geeignete Massnahmen zur Linderung der Konsequenzen ergriffen werden.

Die Versuchsreihe zum Thema «*Kühlbarkeit der Schmelze ausserhalb des Reaktordruckbehälters*» beinhaltete sieben «*Small Scale Water Ingression and Crust Strength*» (SSWICS) Tests sowie einen «*Melt Eruption Test*» (MET). Daraus wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Die SSWICS-Versuche zeigten, dass das Kühlwasser bereits während dem Quenchen (schnelles Kühlen/Abschrecken) in die Kernschmelze eindringt und dadurch den Wärmeabtransport erhöht. Mit zunehmendem Betongehalt in der Kernschmelze nimmt der Wärmeabtransport allerdings wieder ab, ohne signifikante Abhängigkeit vom Betontyp.
- Festigkeitstests an der sich bildenden Kruste zeigten, dass die mechanische Festigkeit der Kruste, welche durch Quenchen mit Kühlwasser entstanden ist, um bis zu zwei Grössenordnungen kleiner ist als die Festigkeit von festem Corium (Kernschmelze-Beton-Gemisch). Unter echten Bedingungen in einer Reaktorgrube kann davon ausgegangen werden, dass die Kruste schon unter sehr kleinen Kühlwasserlasten auseinander bricht, und dadurch die Kühlbarkeit der Schmelze verbessert wird.

Die Versuchsreihe zur Schmelze-Beton-Wechselwirkung umfasste drei CCI-Tests (*Core-Concrete-Interaction*) und hat zu folgenden Erkenntnissen geführt:

- Alle drei Versuche zeigten eine abnehmende Temperatur der Schmelze mit vorschreitender Betonabtragung.
- Die beiden ersten Versuche CCI-1 und CCI-2 zeigten eine Krustenbildung in der Wechselwirkungszone zwischen Beton und der Schmelze. Dadurch wurde die Abtragung von Beton massiv verlangsamt und die Temperatur blieb längere Zeit stabil. Die Kruste zerbrach jedoch im weiteren Verlauf des Versuchs, so dass die Schmelze-Beton-Wechselwirkung fortschritt.
- Das Verhalten der Abtragung des Betons ist stark abhängig vom Betontyp. Beim kalksandsteinhaltigen Beton waren die axiale und die

laterale Abtragung gleich stark ausgeprägt. Beim siliziumhaltigen Beton war die laterale Abtragung bis zu viermal stärker als die axiale. Die Unterschiede in den Testresultaten sind primär auf die anderen chemischen Zusammensetzungen, und der dadurch veränderten Gasbildung bei den beiden untersuchten Betontypen zurückzuführen.

Die beiden Versuchsreihen haben im Hinblick auf die Anwendung in Schwerunfallcodes die noch kleine Datenmenge weiter verdichtet, so dass die Unsicherheiten, insbesondere bezüglich des Verhaltens der Betonabtragung, verkleinert werden können.

OECD OPDE – Piping Failure Data Exchange Project [8]: Das OECD NEA *Piping Failure Data Exchange Project* (OPDE) wurde 2001 von Mitgliedsländern der OECD zur Schaffung einer Datenbank über Schäden an Rohrleitungen in Kernkraftwerken ins Leben gerufen. Inhalt der OPDE-Datenbank sind Informationen von Befunden an sicherheitstechnisch klassierten und risikorelevanten Rohrleitungen, die zu Wandstärkeschwächungen, Rissen, Leckagen oder Brüchen geführt haben. An dem Projekt beteiligen sich zurzeit zwölf Länder, wobei die HSK die Koordination der Daten für die Schweiz wahrnimmt. Der internationale Erfahrungsaustausch beschleunigt insbesondere den Erkenntnisgewinn über alterungsbedingte Schädigungsmechanismen, da sich aus der grösseren Zahl von Daten besser ableiten lässt, welche Einflussfaktoren bei solchen Schädigungsmechanismen eine Rolle spielen.

In der zweiten Phase des Projektes steht die aktive Bewirtschaftung der Datenbank durch die beteiligten Organisationen im Vordergrund. Fast alle beteiligten Länder konnten ihre Datensätze aufarbeiten und einfügen. Im Jahr 2006 erhöhte sich die Zahl der Datensätze von Rohrleitungsschäden um 127 auf 3675. Teilweise bestehen noch Rückstände bei der Übertragung der nationalen Datensätze in das einheitliche Format der OPDE-Datenbank. Die Ressourcen für diese Tätigkeit müssen von den beteiligten Ländern bereitgestellt werden.

OECD-ICDE – Common Cause Failure Data Exchange [9]: Das *International Common-Cause Failure Data Exchange* (ICDE) Projekt wird seit 1998 unter der Aufsicht der OECD Nuclear Energy Agency betrieben. Generelles Ziel dieses Projektes 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. CCF-Ereignisse werden über längere Zeiträume gesammelt und ausgewertet, um die Ursachen

derartige Ereignisse besser zu verstehen und um mögliche Massnahmen zur Verhinderung oder zur Eingrenzung der Auswirkungen derartiger Ereignisse zu ergreifen. Diese Daten können zudem für die Quantifizierung der Wahrscheinlichkeiten von CCF genutzt werden. CCF kommt bei der Bestimmung der Zuverlässigkeit der im Rahmen der Probabilistischen Sicherheitsanalysen berücksichtigten Sicherheitssysteme besondere Bedeutung zu, da diese die Funktion mehrerer Redundanzen (Teilsysteme) beeinträchtigen können. Zurzeit beteiligen sich neben der Schweiz zehn weitere Länder am ICDE-Projekt, in denen der Grossteil der weltweiten Kernkraftwerke betrieben wird.

Der Stand der Sammlung und Auswertung von CCF-Ereignissen stellt sich folgendermassen dar:

- Die Überprüfung der für den Komponententyp «Füllstandsmessung» gesammelten Daten auf Konsistenz ist abgeschlossen. Die Erstellung des Analyseberichts im Entwurf ist bis Ende April 2007 geplant.
- Der Entwurf des Auswertungsberichts für den Komponententyp «Leistungsschalter» ist von den Projektmitgliedern mit wenigen Korrekturvorschlägen akzeptiert worden. Der Bericht wird bis Ende April 2007 an die Arbeitsgruppe «Committee on the Safety of Nuclear Installations» (CSNI) der OECD-NEA für die abschliessende Verabschiedung weitergeleitet.
- Die Datensammlung für den Komponententyp «Steuerstabantriebe» ist abgeschlossen. In der nächsten Projektsitzung im Frühjahr 2007 ist ein erster Erfahrungsaustausch über die gesammelten Ereignisse geplant.
- Für den neu in die Datensammlung aufgenommenen Komponententyp «Wärmetauscher» wurde ein erster Entwurf einer Kodierungs-Richtlinie erstellt.

OECD FIRE – Fire Incident Record Exchange [10]: Das Ziel des Projektes *OECD Fire Incident Record Exchange* (OECD FIRE) 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 neun bisherigen Teilnehmern (Deutschland, Finnland, Frankreich, Japan, Schweden, Schweiz, Spanien, Tschechien, USA) sind in 2006 mit Kanada und den

Niederlanden zwei weitere OECD-Mitgliedstaaten dem Projekt beigetreten.

Nach der ersten Projektphase (2003-2005) wurde in 2006 die zweite, ebenfalls auf drei Jahre geplante, Projektphase (2006-2008) gestartet. Planmässig wurden Daten zu weiteren Brandereignissen gesammelt und die zu der bereits festgelegten Datenbankstruktur gehörende Dokumentation (*Coding Guidelines*, *Quality Assurance Manual*, *Operating Guidelines*) weiter entwickelt. Die Anzahl der bislang ausgewerteten Brände (140 Ereignisse) ist nach wie vor zu klein, um aussagekräftige statistische Schlüsse zu ziehen. Über das Projekt und dessen vorläufige Ergebnisse wurde an der Konferenz ESREL 2006 in Estoril, Portugal, berichtet.

OECD CABRI Waterloop Project [11]: Im CABRI-Waterloop-Projekt der OECD/NEA und des «Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)» sollen am Forschungsreaktor CABRI in Cadarache, Frankreich, Versuche zum Hochabbrandverhalten von Brennstäben bei schnellen Reaktivitätsstörfällen in Kernreaktoren durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wird der bisher mit Natrium gekühlte Testloop des CABRI-Reaktors auf Wasserkühlung umgebaut, damit die Versuchsanordnung den in Leichtwasserreaktoren vorhandenen Betriebs- und Störfallbedingungen besser entspricht. Der CABRI-Reaktor ist weltweit neben dem Forschungsreaktor NSRR in Japan die einzige Anlage, an der das Brennstoffverhalten bei schnellen Reaktivitätsstörfällen in Leichtwasserreaktoren realitätsnah simuliert werden kann. Die Versuchsergebnisse des «*CABRI International Project* (CIP)» werden es erlauben, die Störfallphänomene in den verschiedenen Berechnungsprogrammen (z. B. SCANAIR und FALCON, welche vom PSI verwendet werden) genauer zu modellieren und die festgelegten Sicherheitskriterien für Reaktivitätsstörfälle zu verifizieren und nötigenfalls zu verbessern.

Im Jahre 2006 wurden folgende Projektziele erreicht:

- Die Materialprobleme bei der Verwendung von Zircaloy für die Sicherheitshülle des CABRI-Waterloop konnten gelöst werden. Die Fertigung der Testzelle begann Mitte 2006.
- Die CIP-Testmatrix wurde überprüft und modifiziert.
- Weitere CIP-Tests wurden rechnerisch modelliert.
- HSK und KKW Leibstadt (KKL) erarbeiteten einen Vorschlag, um an der Versuchsanlage PROMETRA mechanische Tests mit KKL-Hüllrohrmaterial durchführen zu lassen.

OECD COMPSIS – Exchange of Operating Experience Concerning Computer-based Sys-

tems Important to Safety [12]: Der Zweck des Projektes «OECD Exchange of Operating Experience Concerning Computer-based Systems Important to Safety» (OECD COMPSIS) ist es, Informationen über die Zuverlässigkeit von rechnerbasierten Systemen in Kernkraftwerken zwischen den OECD-Mitgliedstaaten auszutauschen. Als übergeordnete Ziele sollen ein Beitrag an die Zuverlässigkeit von softwarebasierten Ausrüstungen geleistet, und Angaben zur Risikoanalyse von solchen Ausrüstungen geliefert werden. Die Fehlerarten von digitalen leittechnischen Systemen sind zum Teil unterschiedlich zu denjenigen von konventionellen leittechnischen Systemen; u. a. ist mit dem Auftreten von *Common-Cause*-Ausfällen aufgrund von Fehlern identischer Software in mehreren Teilsystemen zu rechnen.

Zur Probe wurde bereits vor 2004 eine Codierungsrichtlinie für Ereignisse mit rechnerbasierten Systemen erarbeitet und eine Anzahl Ereignisse aus verschiedenen Ländern codiert. Im Jahre 2006 wurden die definitiven Codierungsrichtlinien und eine dazu passende über das Internet zugreifbare Benutzerschnittstelle erstellt, damit die Teilnehmer ihre «COMPSIS-Ereignisse» implementieren konnten.

STRAHLENSCHUTZ

Zusammenarbeit in der Dosimetrie [13]: Die Personendosimetrie der äusseren und inneren Strahlenexposition ist eine wichtige Aufgabe des Strahlenschutzes. Die Dosimetrieverordnung stellt hohe technische Anforderungen an die Dosimetriestellen. Erhebliche Bedeutung haben auch die Messungen zur Freigabe von Materialien aus kontrollierten Zonen und zur Überwachung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung. Die Sektion Messwesen der Abteilung für Strahlenschutz und Sicherheit des PSI ist vom Bundesamt für Metrologie (METAS) als akkreditierte Stelle zugelassen und befasst sich mit Fragen zur Eichung und zur Kalibrierung von Dosimetriesystemen und Strahlenmessgeräten. Die vorliegende Vereinbarung ermöglicht der HSK Expertisen sowie Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Strahlenmesstechnik durchführen zu lassen. Im Berichtsjahr wurde die Aeroradiometrie (Fig.3) aus organisatorischen Gründen in diese Vereinbarung integriert.

Die Aeroradiometrie ist ein wichtiges Element der schweizerischen Notfallorganisation und wird seit 1994 eingesetzt. Die flächenhaften radiometrischen Aufnahmen erlauben eine rasche Erfassung des Strahlungspegels in grösseren, auch unzugänglichen Gebieten. In jährlichen Übungen wird die Einsatzbereitschaft sichergestellt und der Bedarf für Erneuerungen ermittelt. Die Aeroradiometrie wurde im Jahre 2006 über dem Unteren Aaretal und Stadtgebieten beübt. An der Übung

waren Messteams des Labors Spiez, der HSK, des Bundesamt für Gesundheit sowie des IRA Lausanne mit Messungen am Boden beteiligt. Ziel war der Vergleich der vom Boden und aus der Luft erhobenen Resultate. Dabei ist keine unzulässige, durch den Menschen verursachte Radioaktivität nachgewiesen worden.

Zusammenarbeit in der Radioanalytik [14]: Die Messtechnik im Strahlenschutz hat einen hohen Stand erreicht. Dennoch ergeben sich immer neue Anforderungen aus der Praxis, denen mit Neuentwicklungen von Messmethoden und mit neuen Lösungsansätzen begegnet werden muss. Beispiele sind Freigabemessungen von als Altlast angefallenen Schlämmen oder Messungen von Umweltproben im Rahmen der Immissionsüberwachung oder von Proben zur Überwachung der Inkorporation.

Im PSI befasst sich die Sektion Messwesen der Abteilung für Strahlenschutz und Sicherheit mit Fragestellungen dieser Art. Die vorliegende Vereinbarung ermöglicht es der HSK, Entwicklungsarbeiten für Analyse- und Messmethoden durchführen zu lassen. Dank der Zusammenarbeit ist gewährleistet, dass die Aufsichtsbehörde jederzeit Probenanalysen durchführen lassen kann. Ein wesentlicher Gewinn der Vereinbarung ist die Umsetzung des Stands der Technik der chemischen Trenn- und Analyseverfahren. Bedeutend ist auch die Ausbildung von Nachwuchskräften, die nur dank der Attraktivität von Verfahren nach dem neuesten Stand der Technik für dieses Gebiet gewonnen werden können.

Im Arbeitsplan 2006 sind, nebst der Teilnahme an internationalen Vergleichsmessungen und möglichen *ad hoc* Arbeiten, drei Teilprojekte vereinbart worden:

- **Analyseverfahren für Abwasserschlämme:** Weit fortgeschritten ist die Entwicklung von Analyseverfahren für Abwasserschlämme, die als Altlast in einem Rückhaltebecken des PSI vorliegen. Am Trockenschlamm ist der Gehalt von Tritium und C-14 mit der in den Vorjahren in Betrieb genommenen Benzol-Syntheseapparatur bestimmt worden. Des weitern wurden die zugehörigen gammastrahlenden Leitnuklide spektrometrisch in den Nass-, Trocken- sowie Aschenanteilen gemessen. Im Hinblick auf die Bestimmung von Strontium und Aktiniden ist ein Mikrowellenaufschlussverfahren experimentell evaluiert und erfolgreich angewendet worden. Die Ergebnisse dienen der Evaluation des Entsorgungsverfahrens und der Spezifizierung der radioaktiven Abfälle.
- **Messung hochenergetischer Gammastrahlung:** In Feldmessungen konnte die hochenergetische Gammastrahlung aus dem Maschinenhaus eines Siedewasserreaktors in der



Figur 3: Radiometrische Messungen mithilfe eines Super Pumas der Schweizer Luftwaffe (Quelle: HSK).

Schweiz erstmals spektrometrisch bestimmt werden. Ziel der Messung war die Bestimmung des Dosisanteils der hochenergetischen Strahlung am Arealzaun. An der ausgemessenen Stelle beträgt der Dosisanteil mit Energien grösser als 2 MeV bei Reaktorbetrieb zirka 20 %, bei natürlicher Strahlung zirka 5 %.

- **Immissionsüberwachung:** Für die Immissionsüberwachung von ZWILAG und PSI ist, im Rahmen eines *ad-hoc*-Auftrags, ein Aerosol-sammler an einem neuen Standort in Betrieb genommen worden. Die Ergebnisse wiesen ausschliesslich auf natürlich vorkommende Radioaktivität hin, und zeigten, im Vergleich zum alten, während zwei Monaten parallel betriebenen Sammler, eine gute Übereinstimmung.

ARTIST – Aerosol Trapping in a Steam Generator [15]: KKW-Unfallsequenzen mit Kernschmelzen, Containment-Bypasssequenzen, Dampferzeuger-Heizrohrbruch und fehlerhafter Isolierung des Dampferzeugers haben nach heutigem Kenntnisstand zwar eine ausserordentliche geringe Eintretenshäufigkeit, da bei diesem Unfalltyp jedoch radioaktive Stoffe direkt an die Umwelt abgegeben werden, sind sie für Risikobetrachtungen von Kernkraftwerken trotzdem von sehr hoher Bedeutung. Es ist wichtig zu wissen, welcher Anteil der bei einem Kernschmelzunfall freigesetzten Aerosole auf der Primär- und Sekundärseite des Dampferzeugers zurückgehalten wird.

Das Ziel des internationalen ARTIST Experiments ist es deshalb, die Rückhaltungsprozesse im Dampferzeuger genauer zu quantifizieren. Daten und Informationen über den Aerosoltransport durch die Dampferzeuger bei unterschiedlichen Störfallbedingungen werden erfasst, und für die Modellentwicklung aufbereitet. Damit ergeben sich ein tieferes Verständnis dieser dynamischen und komplexen Vorgänge, eine realistischere Modellierung und damit eine realistischere Abschätzung des Risikobeitrags der entsprechenden Störfallsequenzen.

Das Projekt ist in sieben Projektphasen gegliedert, wobei in den ersten sechs Phasen Einzelaspekte des Aerosoltransports durch den Dampferzeuger behandelt werden und die siebte Phase als Integraltest vorgesehen ist. Für die folgenden Phasen wurden Experimente durchgeführt und Resultate gewonnen:

- **Phase I (Abscheidung von Aerosolen in geraden und gebogenen Rohren):** Grosse Anstrengungen wurden für die Entwicklung von Methoden der Aerosol-Generierung im Mikrometerbereich unternommen und sieben Versuche mit unterschiedlichen Aerosolen, Rohrkonfigurationen und Anfangsbedingungen durchgeführt (Fig. 4).
- **Phase II (Abscheidung von Aerosolen im Nahbereich des Dampferzeuger-Heizrohrbruchs):** Die Abhängigkeit des Ablagerungsprozesses vom Herstellungsverfahren der Testaerosole wurde aufgezeigt.
- **Phase VI (Abscheidung von Wassertropfen im Tropfenabscheider und Dampftrockener):** Tropfendurchmesser, Abscheidungsgrad und Geschwindigkeitsprofile wurden ermittelt. Eine vorläufige Bewertung der Ergebnisse zeigte, dass die effektivste Abscheidung von Aerosolen im Drallblech («swirl vane») des Tropfenabscheiders erfolgt und die Rückhaltung im Dampftrockener im Vergleich verhältnismässig gering ausfällt. Des Weiteren wurde die Abhängigkeit des Abscheidungsgrades von der Tropfengrösse und der Durchflussrate des Trägergases aufgezeigt.
- **Phase VII (Integraltest):** Es wurden drei Versuche mit unterschiedlichen Aerosolen durchgeführt und die Abscheidungsgrade gemessen. Die Abhängigkeit des Abscheidungsgrades von der Aerosolgrösse und vom zugrunde liegenden Material des Aerosols wurde aufgezeigt.

Für die Phasen III bis V (*Abscheidung von Aerosolen im Fernfeld des Dampferzeuger-Heizrohrbruchs, Abscheidung von Aerosolen im Tropfenabscheider und Dampftrockener, und Abscheidung von Aerosolen im gefluteten Dampferzeuger*) wurden im Berichtsjahr keine Untersuchungen vorgenommen.



Figur 4: ARTIST Rohrbündel nach einem Aerosoltest. Die Rohre sind mit einer Schicht von Aerosolen belegt, die sich im Test abgelagert haben und somit im Bündelbereich zurückgehalten wurden (Quelle: PSI).

TRANSPORT UND ENTSORGUNG

Mont Terri – EZ-B: Mechanical Heterogeneities and Fracture Generation in the Excavated Disturbed Zone (EDZ) [16]: Das internationale Forschungsprojekt Felslabor Mont-Terri wurde 1996 unter dem Patronat der Landeshydrologie und –geologie (LHG) in Angriff genommen mit dem Ziel, die hydrogeologischen, geochemischen und felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons zu untersuchen, die für die Beurteilung der Sicherheit und die Abklärung der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für radioaktive Abfälle in diesem Gestein massgebend sind.

Neben der Charakterisierung des Opalinustons stehen heute vermehrt auch Demonstrationsversuche im Vordergrund, mit welchen z.B. der Einfluss von Wärme, von Gas oder von alkalischen Zementwässern auf den Opalinuston und die Erprobung von technischen Materialien für die Abdichtung und Versiegelung von Untertagebauwerken (Schacht, Stollen) untersucht werden.

2006 standen beim EZ-B Experiment verschiedene Wiederholungsmessungen, die Kompilation der Daten sowie die Auswertung der Ergebnisse



Figur 5: Blick in den Teststollen des EZ-B Experimentes (Länge 6.5 m, Durchmesser 3.8 m). Deutlich erkennbar ist die Spur der vor dem Ausbruch des Teststollens abgeteuften horizontalen Bohrung auf der rechten Seite des Bildes, welche zusammen mit einer weiteren Bohrung zur seismischen Charakterisierung des Gebirges diente (Quelle: HSK).

im Mittelpunkt des Projektes. Dabei wurden von der ETH-Zürich folgende Arbeiten ausgeführt:

- Analyse der mittels 3D-Laser-Scanner Messungen beobachteten Verformungen (Konvergenz) im First und den Seitenwänden des Teststollens (Fig. 5). Dazu wurde ein neues Auswertungsprogramm entwickelt, mit welchem der Rauschpegel der Messungen verkleinert und die Datenqualität verbessert wurde.
- Auswertung der bohrlochseismischen Messungen. Anhand der beobachteten reduzierten seismischen Wellengeschwindigkeiten kann die Ausdehnung der Auflockerungszone um den Teststollen auf 0.3 bis maximal 1.4 m eingegrenzt werden.
- Weiterführung der kontinuierlichen Messungen der Porenwasserdruckverhältnisse in den Beobachtungsbohrungen um den Teststollen. Diese Untersuchungen sind erforderlich, um hydraulisch-mechanisch gekoppelte Prozesse erfassen und in den Rechensimulationen berücksichtigen zu können.
- Labormessungen an Opalinuston-Gesteinsproben zur Bestimmung der felsmechanischen Kenngrößen des Gesteins, die für die Simulation des Verformungs- und Bruchverhaltens des Gesteins notwendig sind.
- Kompilation aller Messdaten zur Generierung eines geometrischen 3D-Modells der Auflockerungszone; Modellierung des Verformungsverhaltens des Teststollens mittels eines numerischen Codes (PHASE2); Vorbereitung der Simulation des Bruchverhaltens des Opalinustones mittels FRACOD2D von *Fracom Ltd.* mit Berücksichtigung der Anisotropie des Gesteins.

Das EZ-B Experiment hat gezeigt, dass die durch den Stollenbau verursachten Veränderungen im Opalinuston lokal begrenzt bleiben. Die Entwicklung der Auflockerungszone erweist sich dabei als komplexer Vorgang, der von den Spannungsverhältnissen im Gebirge sowie der Anisotropie des Gesteins (Schichtgefüge) und präexistierenden strukturellen und stofflichen Heterogenitäten beeinflusst wird.

MENSCH, ORGANISATION UND SICHERHEITSKULTUR

OECD Halden Reactor Project (HRP) – Man, Technology, Organization [4]: Die Erforschung des menschlichen Leistungsvermögens («*Human Performance*») bei der Bedienung komplexer Systeme bildet ein Schwerpunkt der MTO-Forschung in Halden. Seit einigen Jahren steht die Verbesserung des Wissensstands in der kognitiven Ergonomie im Vordergrund. Darunter versteht man die Systemgestaltung unter Berücksichtigung menschliche Fähigkeiten und Begrenzungen bezüglich Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung. Derartige Studien sind nur dank Einrichtungen wie beispielsweise dem Halden *Man-Machine Laboratory* (HAMMLAB) überhaupt möglich.

Im Bereich «*Human Performance*» nutzt Halden Experimente mit Operateuren aus Kernkraftwerken für die Validierung verschiedener *Human Reliability Analysis* (HRA)-Methoden. Dabei werden die Voraussagen verschiedener Teams, die mit verschiedenen HRA-Methoden arbeiten mit den Ergebnissen aus HAMMLAB-Experimenten verglichen. Anhand der Resultate soll die Güte der gemachten Voraussagen verbessert werden.

Im Bereich «*Design & Evaluation of Human System Interfaces and Control Rooms*» wurde eine neue Strategie für den Forschungszweig «*Human-System Interfaces*» erarbeitet. Dabei setzt Halden vermehrt auf die Erprobung von Schnittstellen, welche die kognitive Arbeit des Operators optimal unterstützen (so genannte «*ecological interfaces*» EI). Ein erstes HAMMLAB-Experiment mit 14 verschiedenen Schichten zeigt, dass derartige Schnittstellen die Übersicht der Operateure während schweren Unfallszenarien begünstigen. Bei Szenarien innerhalb der Auslegung schnitten jedoch traditionelle Schnittstellen besser ab.

Human Reliability Analysis [17]: Mit der «*Human Reliability Analysis*» (HRA) 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 Wahrscheinlichkeiten für Handlungen zu bestimmen, die während eines Störfalls gefordert sind, aber unterlassen werden. Hingegen fehlt eine effiziente Methode zur systematischen Erfassung und Quantifizierung von EOC («*Errors of Commission*»: ungeplanten, menschlichen Handlungen, welche den Verlauf eines Störfalls negativ beeinflussen). Die Projektziele und deren Umsetzung für das Jahr 2006 lassen sich wie folgt charakterisieren:

- **Errors of Commission:** Bereits im Rahmen des Vorgängerprojektes (HRA-II) wurde die so genannte »*Commission Errors Search and Assessment*» Methode (CESA) entwickelt. Im Jahr 2006 wurde als Standortbestimmung der Entwicklungsstand anderer EOC-Methoden systematisch mit der CESA-Methode verglichen. Es zeigte sich, dass die anderen Methoden keine wesentlichen Vorteile bei der Identifizierung von EOC bieten. Mit Ausnahme von geringfügigen Verfeinerungen soll deshalb der CESA-Identifizierungsansatz für das weitere Vorgehen beibehalten werden.
- **Dynamische Modelle:** Mit dynamischen Modellen für das Anlagen- und Personalverhalten soll die HRA unterstützt werden. Die Verfügbarkeit von wichtigen Anlageparametern zu beliebigen Zeitpunkten verbessert insbesondere die Modellierungsgrundlagen der Diagnoseprozesse der Operateure. Da im Modell die entsprechenden Vorschriften abgebildet werden können, kann die Software eigenständig Szenarien entwickeln, die EOC beinhalten.
- Zusätzlich zum geplanten Forschungsvorhaben untersuchte das PSI die Eignung von «*Fuzzy Expert Systems*» im Hinblick auf die Modellierung von Abhängigkeiten von Operateurhandlungen. Es zeigte sich, dass solche Systemen einen viel versprechenden Ansatz darstellen.

Die PSI-Forscher beteiligen sich zudem an führenden, internationalen Arbeitsgruppen im Bereich HRA. Beispielsweise leiten sie im Rahmen der «*Working Group on Risk Assessment*» (WG-RISK) der OECD-NEA ein Projekt zur Entwicklung einer HRA-Datenbank. Als neue internationale Aktivität kam im Jahr 2006 die Beteiligung am internationalen Projekt «*Empirical Testing of HRA Methods*» in Halden zur Sammlung und zur Auswertung von HRA-Simulatordaten hinzu.

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 IAP¹ in Zürich im Auftrag 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.

Im Berichtsjahr standen die Informationsbeschaffung und die Evaluation eines geeigneten Verfahrens zur Erstellung der Profile im Vordergrund. Basierend auf einer intensiven Literaturrecherche und der Konsultation von Experten auf dem Gebiet der Eignungsdiagnostik wurde der «*Fleishman*

Job Analysis Survey» als bestgeeignete Methode ausgewählt. Diese Methode stammt aus dem angloamerikanischen Raum und ist nicht speziell auf Kernanlagen ausgerichtet. Deshalb musste das Verfahren übersetzt und anschliessend an schweizerische Verhältnisse und insbesondere an die Bedürfnisse der Kernanlagen angepasst werden. Dies erfolgte in einem ersten Iterationsschritt in enger Zusammenarbeit mit den schweizerischen Kernkraftwerken.

Es wurde zudem damit begonnen, erste Daten für die Ermittlung der Anforderungsprofile in schweizerischen Kernkraftwerken zu erheben. Dabei stellten sich auch neue methodische Fragen, welche im Laufe des Projekts weiterbehandelt werden sollen.

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 geplante Nachfolgeprojekte sowie über die Umsetzung der Resultate in die schweizerische Sicherheits- und Aufsichtspraxis diskutiert wurde. Neben dem *Paul Scherrer Institut* findet im Rah-

men der regulatorischen Sicherheitsforschung die Zusammenarbeit mit folgenden Institutionen statt: Nationale Alarmzentrale (NAZ) in Zürich, Sektion für die Überwachung der Radioaktivität (SUER) in Fribourg, Institut de Radiophysique Appliquée (IRA) in Lausanne, Universität Bern, ETH Zürich, EPF Lausanne, Functional Genomics Center der Universität Zürich, Universität Fribourg, Zwischenlager Würenlingen AG (ZWILAG).

Internationale Zusammenarbeit

Die folgenden Projekte sind direkt oder indirekt in Forschungsprojekte des EU-Rahmenprogramms eingebunden:

KORA [1]: *Integrated Infrastructure Initiatives for Material Testing Reactors Innovations (MTR+I3)*, 6th Framework Programme for Research, Technological Development and Demonstration, NUCTECH-2005/6-3.4.4.1-1, EURATOM-2005-6; *Nuclear Plant Life Prediction (NULIFE)*, Network of Excellence, NUCTECH-2005/6-3.4.3.1-1, EURATOM-2005-6.

DIAGNOSTIK-II [2]: *Network of Excellence NULIFE (Nuclear Plant Life Prediction)*, EURATOM 6th Framework Program (Residual Lifetime Management).

STARS [3]: *NURESIM*, EURATOM 6th Framework Program.

MSWI [5]: *SARNET, EURATOM 6th Framework Program*.

MELCOR [6]: *SARNET, EURATOM 6th Framework Program*.

Bei den folgenden Projekten handelt es sich um internationale Kooperationsprogramme:

OECD Halden Reactor Project [4], **OECD-MCCI** [7], **OECD-OPDE** [8], **OECD-ICDE** [9], **OECD-FIRE** [10], **OECD CABRI Water Loop Project** [11], **OECD COMPSIS** [12], **ARTIST** [15], **MONT TERRI** [16].

Weitere internationale Kooperationen im Rahmen von Forschungsprojekten, internationalen Organisationen und Standardisierungsaktivitäten können den einzelnen Projektberichten entnommen werden.

¹ Heute «Hochschule für Angewandte Psychologie HAP»

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

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 sehr 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. Der Trend zu internationalen Forschungskooperationen setzte sich auch in diesem Jahr fort. Die Forschungsprojekte, welche im Jahr 2007 gestartet werden, orientieren sich inhaltlich ebenfalls an

den einleitend beschriebenen Schwerpunkten. Grösstenteils handelt es sich dabei um Nachfolgeprojekte der im Berichtsjahr abgeschlossenen Aktivitäten.

Die HSK wird im Jahr 2007 ihre Forschungsstrategie überarbeiten. Die Sicherheitsforschung muss so definiert werden, dass aus den Forschungsprojekten auch in Zukunft ein möglichst grosser Nutzen für die Aufsichtstätigkeit der HSK und damit für die nukleare Sicherheit resultiert. Als zukünftige Herausforderungen stehen dabei der Know-how-Verlust in der Kernenergiebranche, Betriebsdauerverlängerungen und der Ersatz der bestehenden Werke im Vordergrund.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 vorhanden.

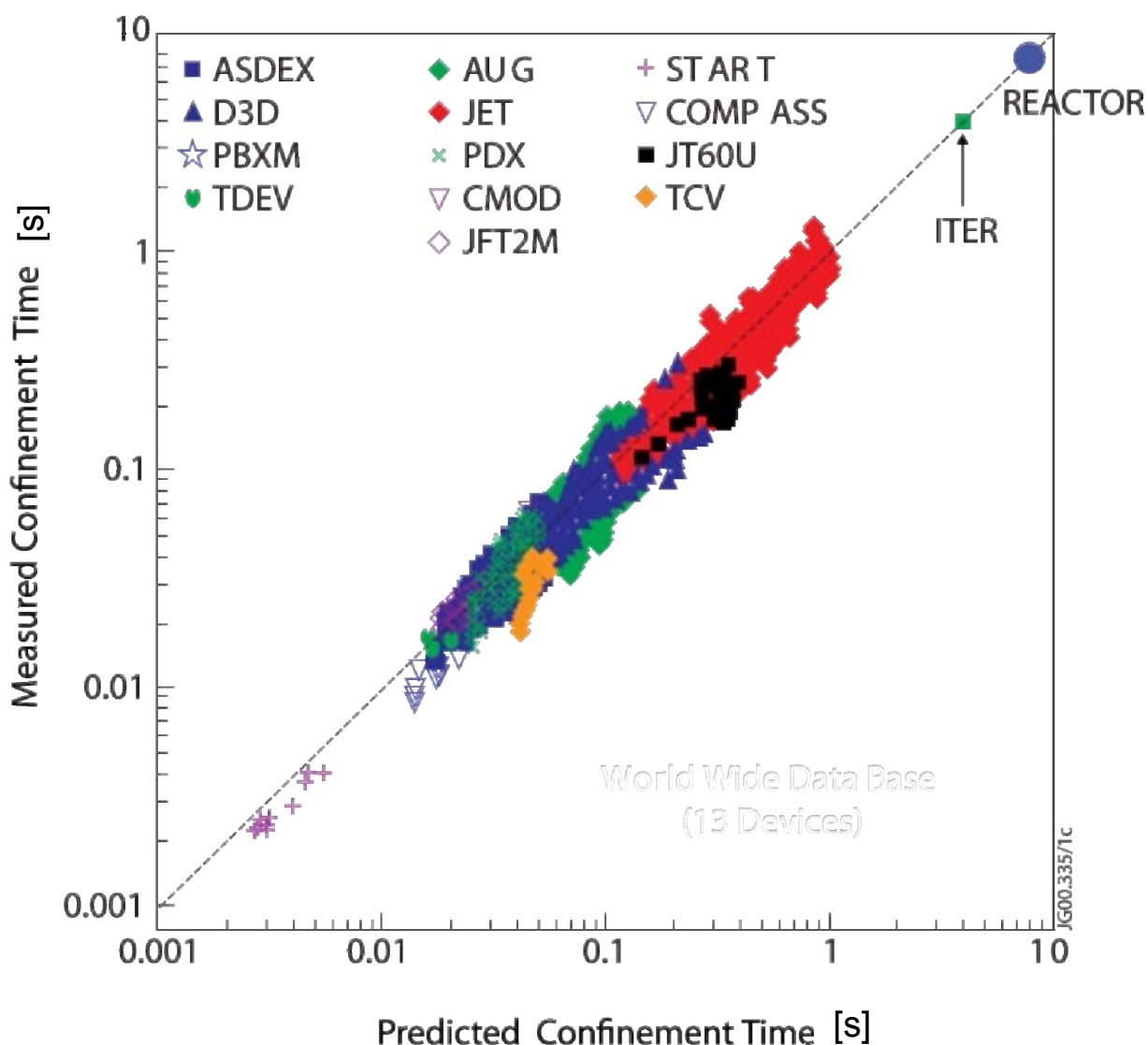
Die Berichte sowie weitere Informationen sind im HSK-Dokumentenarchiv unter www.hsk.ch erhältlich.

- [1] H.P. Seifert, S. Ritter, U. Ineichen, B. Gerodetti, 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] 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)
- [4] W. Wiesenack, F. Øvre (Wolfgang.Wiesenack@hrp.no), Halden Reactor Project, N-1750 Halden, Norway, **OECD Halden Reactor Project: Fuels and Materials / Man, Technology, Organisation** (JB)
- [5] T.N. Dinh, W.M. Ma, A. Karbojian, P. Kudinov, T.C. Thanh (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] Tim Haste und Jon 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] A. Hügli (Andre.hugli@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] J. Papin, M. Petit, V. Georgenthum (joelle.papin@irsn.fr), Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN), **OECD CABRI Waterloop 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] Ch. Schuler, G. Butterweck, R. Habegger, S. Mayer und C. Wernli (christoph.schuler@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232, **Zusammenarbeit in der Dosimetrie** (JB)
- [14] J. Eikenberg, M. Jaeggi (jost.eikenberg@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Zusammenarbeit in der Radioanalytik** (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, F. Lemy, K. Evans (loew@erdw.ethz.ch), Chair for Engineering Geology, ETH Zürich, ETH Höggerberg, 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 **Anforderungsanalyse für das Personal in Schweizer KKW** (JB)

PROGRAMME FUSION THERMONUCLÉAIRE CONTRÔLÉE

Andreas Werthmueller

andreas.werthmueller@sbf.admin.ch



Le progrès de la recherche sur la fusion contrôlée

Durée de confinement de l'énergie mesurée de façon expérimentale, représentée en fonction d'une régression tirée de la banque de données *tokamak* mondiale. Le réacteur ITER nous rapprochera considérablement de l'objectif d'utiliser la fusion thermonucléaire comme source d'énergie au quotidien.

Centres de gravité du programme et buts fixés

La recherche sur la physique des plasmas et la fusion contrôlée est un domaine qui intrinsèquement nécessite considérablement de ressources. Il est donc indiqué de combiner et de coordonner des efforts nationaux et internationaux afin de garantir les meilleures efficacité et effectivité possibles. Dans cette optique la Suisse a décidé en 1979 de coopérer avec le programme européen de recherche sur la fusion. Le but ultime de cette coopération entre la Suisse et Euratom est de rassembler les connaissances scientifiques et technologiques afin d'utiliser la fusion thermonucléaire comme source d'énergie durable en termes économique, écologique et social. Les partenaires de la Suisse dans Euratom sont les pays membres de l'UE. La participation suisse se base sur un accord-cadre non limité dans le temps.

La recherche suisse dans le domaine de la fusion thermonucléaire est effectuée principalement par le Centre de recherche pour la physique des plasmas, le CRPP, de l'EPFL. Avec des infrastructures à l'EPFL et au PSI, le CRPP travaille dans la modélisation théorique et expérimentale du plasma, le chauffage du plasma, la supraconductivité et dans la recherche des matériaux. 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 régulation de futurs réacteurs de fusion. Avec ces deux instituts, leurs collaborateurs et leurs travaux, mais aussi avec une participation continue de son industrie, la Suisse a su se positionner en tant que pilier important dans la coopération européenne en recherche sur la fusion.

Travaux effectués et résultats acquis pour 2006

L'ESSENTIEL EN BREF...

- Le 21 Novembre 2006, les sept partenaires internationaux d'*ITER* (l'UE, y compris la Suisse, la Fédération de Russie, la Chine, la Corée du Sud, le Japon, l'Inde et les USA) ont signé un accord d'exécution commun dans le but de construire et d'utiliser *ITER*.
- En parallèle avec l'accord sur *ITER*, l'UE et le Japon ont signé un accord pour cofinancer un programme visant à développer au plus tôt un réacteur de fusion de démonstration. Ce programme, appelé «*Broader Approach*», comprend une phase d'ingénierie de l'installation d'irradiation des matériaux (*IFMIF*), la construction d'un *tokamak* supraconducteur au Japon et l'exploitation d'un «Centre de recherche sur la fusion» au Japon.
- En novembre 2006, la Confédération a prolongé pour une année quatre accords de coopération avec Euratom : le Contrat d'Association, l'Accord d'exécution sur le développement de la fusion *EFDA* (*European Fusion Development Agreement*), l'Accord d'implémentation *JET* et l'Accord d'exécution sur la mobilité des chercheurs.
- À l'EPFL, les recherches se sont poursuivies en physique expérimentale et théorique des plasmas (chauffage, turbulences, effets de bord, etc.), sur diverses technologies importantes pour les réacteurs de fusion (systèmes de chauffage, diagnostic) et, à son antenne localisée au PSI, sur la supraconductivité et les matériaux.

- L'Université de Bâle a collaboré avec les équipes des *tokamaks JET* (à Culham, UK), *TEXTOR* (à Jülich, DE), *Tore Supra* (à Cadarache, FR) et *TCV* (au CRPP/EPFL) pour caractériser les changements de surface que subissent des miroirs de tungstène et de molybdène après une exposition au plasma.

INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REACTOR (ITER)

Le 28 juin 2005, les 6 premiers partenaires d'*ITER*, l'UE, la Russie, la Chine, la Corée, le Japon et les USA ont approuvé le choix du site européen, à Cadarache, comme site du réacteur *ITER*. Peu de temps après, l'Inde s'est jointe au projet comme septième partenaire. C'est donc des pays représentant plus de la moitié de la population mondiale qui seront les acteurs principaux du développement de cette forme d'énergie. Les représentants des sept parties ont signé l'accord final sur la construction d'*ITER* le 21 novembre 2006 à Paris. Les trois textes composant cet accord devront encore être ratifiés par les États signataires. La même journée, le premier Conseil des Gouverneurs d'*ITER* a eu lieu. Alors que la préparation du site a déjà commencé (Figure 1), le début des constructions est prévu pour début 2008. Après une phase de construction de 10 ans, la phase d'exploitation devrait commencer en 2015 et s'étendra au minimum sur 20 ans. Sur la base d'un accord transitoire et durant l'année 2006, la direction du projet *ITER* s'est mise en place. Le japonais Kaname Ikeda a été désigné comme directeur général et l'allemand Norbert Holtkamp comme vice-directeur général.



Figure 1 : le site d'ITER à Cadarache se situe quasiment à portée de l'industrie et de la recherche suisses.

En parallèle avec le projet *ITER*, l'UE et le Japon exécutent un programme visant à développer au plus tôt un réacteur de démonstration ; ce futur réacteur, dénommé *DEMO*, sera conçu pour produire de l'électricité et prouver l'utilisation de la fusion à des conditions économiques (Figure 2). Les projets du programme EU-Japon seront coordonnés par des équipes européenne et japonaise. Sa réalisation rapide nécessite une exploitation efficace d'*ITER* basée sur des expériences préparatoires sur des machines « satellites » comme le *Joint European Torus (JET)* ou un nouveau tokamak (appelé temporairement *NCT*) qui sera construit au Japon. En parallèle, la science et la technologie des matériaux devront être développées. 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. Les études d'ingénierie d'*IFMIF* seront poursuivies avec la réalisation d'un prototype de l'accélérateur de deutérons, les études sur une cible de lithium permettant de produire les neutrons et

sur un porte-échantillons pour *IFMIF*. Finalement, un centre de recherche sera établi au Japon pour permettre diverses activités communes, comme les études sur *DEMO* ou la simulation numérique.

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 d'un programme de l'UE, dans le cadre du traité Euratom. Ce programme, rattaché aux Programmes-cadres et dont le budget représente environ 40 % des sommes totales attribuées à la fusion en Europe, finance l'exploitation et l'utilisation des grandes infrastructures de recherche, comme le *JET (Joint European Torus)* à Culham, Royaume-Uni [3], 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 Programme-cadre (2007-2011) d'Euratom, la recherche en fusion dispose de 1'947 M€. Environ la moitié de cette somme est destinée à la participation européenne à *ITER*. Jusqu'à présent, la recherche européenne s'était organisée sous l'égide de l'*EFDA (European Fusion Development Agreement)* [5], qui gère l'exploitation de *JET* et les travaux préparatoires d'*ITER* en Europe, mais aussi de nombreuses recherches en physique des plasmas et en technologies importantes pour la fusion. Afin de confier la gérance de la participation européenne à *ITER* à un organisme bien adapté à cette tâche, Euratom a préparé le terrain pour la *European Legal Entity*. Cette structure de management servira d'agence domestique pour *ITER* à Euratom.

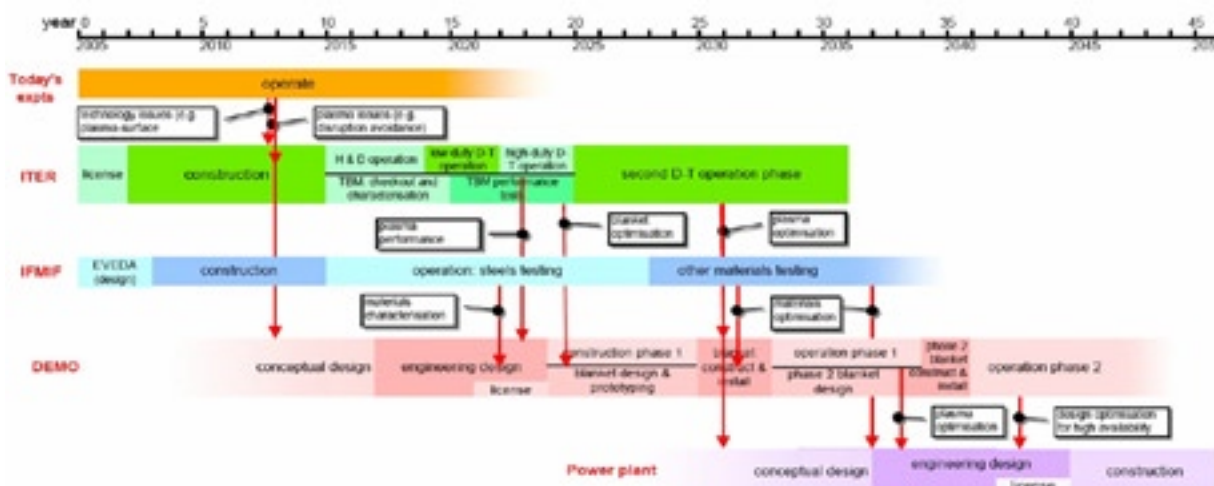


Figure 2 : la planification du projet ITER prévoit une durée de construction d'environ 10 ans, qui a maintenant débuté, suivie d'une durée d'utilisation d'environ 20 années répartie sur deux phases. Ces durées s'inscrivent dans une planification à long terme, passant par DEMO, jusqu'au démarrage des premiers réacteurs à fusion.

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, quant à eux, fixent les modalités de la coopération européenne 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, 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. Tous ces accords sont, en principe, en vigueur pour l'instant jusqu'à la fin 2007.

En plus de sa contribution annuelle au Programme-cadre d'Euratom, la Suisse a participé en 2006 pour exactement 463'863 € au *JET Joint Fund* (un fonds commun pour l'exploitation du *JET* prévue aux termes du *JIA*). Cette contribution a été couverte par les crédits ouverts pour financer les participations suisses au 6^e PCRD de l'UE et qui sont gérés par le SER.

LE CRPP : L'ASSOCIATION SUISSE/EURATOM

Les activités du programme fusion européen sont orientées vers l'utilisation commerciale de la fusion comme source d'énergie. Le pas suivant du processus évolutif consiste à montrer la faisabilité technologique avec le réacteur de recherche *ITER*. Vu que le *JET* est fondé sur le même principe de confinement du plasma qu'*ITER*, il est devenu un véritable banc d'essai pour les technologies d'*ITER*. C'est pourquoi l'année 2006 a été marquée par l'initiation d'un important programme pluri-annuel de modifications de *JET*. Ces modifications portent sur une couverture de la paroi interne en béryllium, matériau identique à celui qui va probablement être utilisé pour la paroi d'*ITER*, sur une augmentation de la puissance de chauffage par injection de particules énergétiques et sur l'implémentation de nouveaux diagnostics. Le but de ce programme est une meilleure simulation et prédiction des conditions et scénarios d'opération d'*ITER*.

Par ailleurs, le programme européen est aussi fortement impliqué dans la recherche sur les matériaux, y compris les études préliminaires de la future grande source de neutrons *IFMIF*. En effet, la conviction est maintenant générale que cette dernière est aussi indispensable qu'*ITER* sur la voie de la domestication de la fusion. Dans le cadre de la «*Broader Approach*», l'UE, avec

la participation de la Suisse, 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.

Comme par le passé, le CRPP a continué en 2006 à être étroitement associé à toutes ces activités¹. 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), la théorie et la simulation numérique, à l'EPFL et, d'autre part, sur la supraconductivité et les matériaux, au PSI. Dans le cadre des perfectionnements apportés au *JET* mentionnés plus haut, le CRPP a développé un nouveau système d'antenne dont une partie a été installée en 2005. En outre, un physicien du CRPP a été nommé *JET Task Force Leader* pour l'étude des phénomènes de bords en physique des plasmas.

Le *TCV (Tokamak à Configuration Variable)* reste le «navire amiral» des installations exploitées par le CRPP à Lausanne. Cette installation, la plus grande de l'EPFL, présente la propriété unique au monde de pouvoir produire des plasmas de formes différentes, ce qui s'avère essentiel pour vérifier les simulations numériques et planifier la géométrie optimale du cœur des futurs réacteurs de fusion. C'est dans ce contexte que les recherches sur le *TCV* se sont poursuivies en 2006.

Un seul gyrotron fournissant 0.5 MW de puissance à la troisième harmonique était disponible durant 2006, mais quatre gyrotrons à la deuxième harmonique fournissaient une puissance de 2 MW. Un progrès important dans la préparation des campagnes à puissance maximale a été réalisé, par exemple, pour les études du «mode H», ainsi que pour les études de faisabilité et de construction de différents diagnostics avec performance améliorée (*upgrade*). En outre, des décharges disruptives ont été analysées et le résultat a été intégré à la base de données internationale de disruptions. Les campagnes ont été conduites selon les missions scientifiques définies dans le cadre de discussions générales au début de l'année. Ces missions correspondent à des thèmes appropriés à *ITER* et à l'amélioration des conditions d'opération d'un *tokamak* en général, couvrant aussi le chauffage, le transport, les barrières de transport internes, le «mode H», la physique du bord, le contrôle, le gain en performance avec densité accrue et des questions relatives aux ondes EB (*Electron-Bernstein*).

Plusieurs nouveaux diagnostics ont été proposés et cela en parallèle à l'amélioration et à la mainte-

¹ Les personnes qui désirent plus de détails sur les recherches du CRPP peuvent commander le «Rapport annuel 2006» que publie cette institution (voir son site : <http://crppwww.epfl.ch>).

nance des diagnostics existants, avec, pour but essentiel, de clarifier des questions en relation avec le profil du courant, ainsi que le profil radial et la nature de la turbulence.

Le groupe de théorie a continué ses études dans plusieurs domaines d'excellence. La théorie et la modélisation numérique portent sur des simulations *ab initio* de turbulence, de la stabilité MHD d'un *tokamak* et du transport (Figure 3) [6]. L'application des ondes RF aux tokamaks et stellarateurs, ainsi que la caractérisation 3D des configurations à confinement magnétique ont été poursuivies.

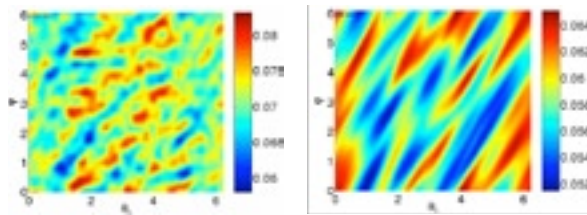


Figure 3 : détails de la turbulence simulée sur une surface magnétique. À gauche, les perturbations se noient dans le « bruit numérique ». À droite, une méthode de filtrage des perturbations dans la direction des lignes de champ magnétique a permis d'éliminer ce comportement non physique (in : CRPP Annual Report 2005, p. 31).

Fluctuations, turbulences et phénomènes de transport liés ont également été les sujets principaux des études sur la machine *TORPEX* dont les caractéristiques de densités et de «basses» températures permettant des mesures à haute résolution des paramètres du plasma et des ondes, et cela n'importe où dans le plasma. Des décharges hautement reproductibles en argon, hydrogène et hélium sont possibles. Des progrès ont été réalisés dans plusieurs domaines, en particulier dans les configurations simples de plasma magnétisé. En parallèle, des travaux préparatoires ont été entrepris pour améliorer les diagnostics et les logiciels de contrôle.

L'objectif principal du groupe «*Fusion Technology Materials*» au PSI est l'investigation des dégâts produit 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. Puisqu'il n'y a actuellement aucune source de neutrons de 14 MeV au monde, il est nécessaire de simuler une telle source, par exemple, en utilisant des

neutrons de fission. Actuellement la plupart des expériences d'irradiation se font avec un spectre mixte en utilisant une combinaison de l'accélérateur de protons du PSI et de la *Swiss Spallation Neutron Source SINQ*. Une gamme d'approches numériques complète les expériences.

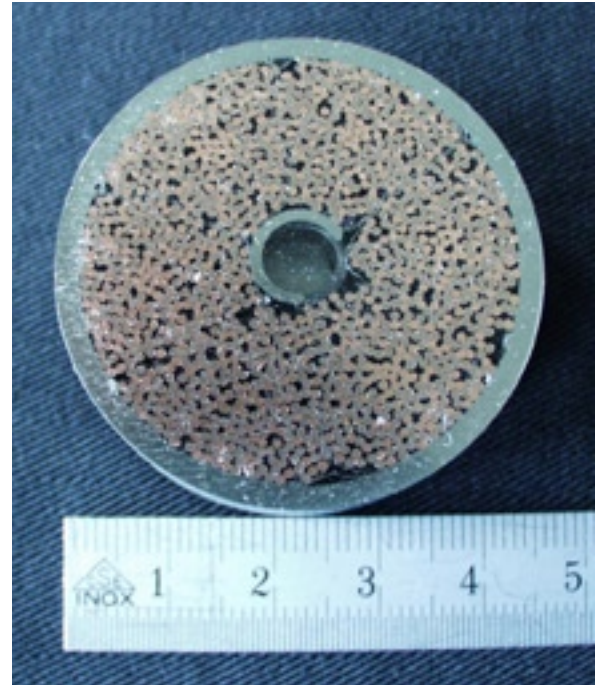


Figure 4 : section d'un câble supraconducteur (PSI).



Figure 5 : la partie centrale du Tokamak à Configuration Variable (TCV) pendant la phase de construction ; on y voit clairement les parties inférieures des aimants pour les champs toroïdaux (TF). Photo : CRPP/EPFL.

En 2006, les tests de supraconducteurs dans *SULTAN* ont démontré une performance décevante des câbles (Figure 4) – proposés pour *ITER* – pour les aimants (Figure 5) devant produire les champs magnétiques toroïdaux (TF) et le concept alternatif, développé au CRPP, a été accueilli favorablement : « *A 3.5 meter conductor sample cabled from strands and produced by the Company EAS has been tested with positive results. The conductor used for the sample was fabricated under supervision of the Italian Fusion Institute at ENEA, and the sample was prepared, heat treated and assembled at CRPP. The test programme involves the operation under conditions representative of the operation in ITER of a TF coil. The sample was therefore tested with a current of 68 kA, in the SULTAN background magnetic field of 10.8 Tesla, and more than 1000 cycles from zero to full current were applied. The performance of the cable proved to be stable under these tests, and the sample passed the acceptance criteria (5.7 K current sharing temperature after 1000 cycles). The EAS strand is therefore considered qualified for the ITER TF coil conductor. Overload tests at 80 kA and a background field of 11 T, which were performed after the cycling, did not show any degradation.* » Le choix du CRPP pour héberger l'installation de test «Dipôle» a été une source d'activités intenses, tant du point de vue de la planification que des tests des conducteurs du dipôle dans *SULTAN*. Les activités concernant les supraconducteurs à haute température (par exemple, celle de l'azote liquide) ont été maintenues, mais avec une priorité plus faible. Les campagnes de mesure dans l'installation JORDI sont terminées et fournissent une base de données unique pour l'analyse des courants dans les supraconducteurs pour *ITER*.

Le chauffage d'un plasma par ondes cyclotroniques-électroniques ECRH dont la fréquence est située au-dessus de la fréquence de coupure d'absorption (deuxième harmonique de la fréquence principale du gyrotron) peut améliorer aussi bien le confinement que la pression du plasma. Ce chauffage électronique à haute densité est obtenu par une combinaison d'injections pratiquement

verticales de la troisième harmonique et d'une onde EB (*Electron Bernstein*) du côté bas champ magnétique. Un nouvel injecteur a été installé dans le plan équatorial. Il permet de changer l'angle d'injection d'ondes pendant un tir, un angle optimal a pu être déterminé ; cela est en accord avec les prédictions numériques.

Pour démontrer l'EBH (*EB Heating*) pour des durées plus longues que le temps de confinement, des impulsions de longue durée et une déposition de l'énergie plus centrale sont utilisées. Un accroissement de la température centrale de plus de 80 eV a été mesuré simultanément par le diagnostic à diffusion Thomson et par la mesure d'absorption des rayons X mous. Ces mesures sont la première démonstration d'un chauffage par conversion double d'un tel mode dans un *tokamak* où le rapport d'aspect est conventionnel.

En collaboration avec des laboratoires spécialisés (*Laboratory of Energy Systems* LASEN de l'EPFL et le *Center for Energy Policy and Economics* CEPE de l'ETHZ) les effets socio-économiques pertinents à la fusion ont été 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 2006 à environ 115 articles scientifiques dans des revues spécialisées et à de nombreuses communications lors des 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 2006, le CRPP a poursuivi ses tâches d'enseignement et ses nombreuses activités de relations publiques visant à expliquer la physique des plasmas et la domestication de la fusion à des non-spécialistes.

Collaboration nationale

L'Institut de physique de l'Université de Bâle a mis à profit son expertise dans l'utilisation de la spectroscopie par émission de photoélectrons pour étudier les propriétés de surface des matériaux qui, dans une installation de fusion, sont exposés au plasma [1]. L'année 2006 a été placée sous le signe des miroirs [2]. En effet, ces surfaces réfléchissantes seront un élément essentiel de plusieurs dispositifs diagnostiques prévus pour *ITER*, puisqu'une exposition directe

des instruments de mesure au plasma n'est pratiquement jamais possible. Des études sont donc en cours dans plusieurs centres de recherche pour développer des miroirs résistant bien aux phénomènes d'érosion et de déposition d'impuretés que l'on observe à l'intérieur d'un réacteur de fusion. L'expertise du groupe de Bâle est un auxiliaire précieux de ces études et des collaborations se sont nouées non seulement avec le CRPP, partenaire traditionnel de Bâle, mais aussi avec les

équipes des *tokamaks TEXTOR*, à Jülich (DE), *Tore Supra*, à Cadarache (FR), et, bien sûr, *JET*, à Culham (UK).

Dans les systèmes de diagnostic, des miroirs sont installés, soit en face du plasma, soit dans des labyrinthes qui conduisent l'image du plasma vers les instruments de mesure. L'érosion superficielle domine à proximité du plasma alors qu'avec un éloignement croissant, c'est le dépôt

d'impuretés qui devient de plus en plus important. Les deux phénomènes influent négativement sur les propriétés réfléchissantes des miroirs et les analyses du groupe de Bâle cherchent à caractériser ces altérations dans des miroirs de molybdène et de tungstène, deux matériaux actuellement envisagés pour les systèmes diagnostiques d'*ITER* en raison de leur bonne résistance à l'érosion.

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)* 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 d'entre eux, l'un concernant la recherche sur les matériaux (EPFL et PSI), l'autre étudiant les interactions plasma-paroi du réacteur (Université de Bâle).

Liste des projets de R&D

(RA) Rapport annuel 2006 existant

(RF) Rapport final existant (voir www.recherche-energetique.ch).

- [1] P. Oelhafen, (peter.oelhafen@unibas.ch), Institut für Physik der Universität Basel : ***Plasma-wall interaction studies related to fusion reactor materials***. RF.
- [2] P. Oelhafen, (peter.oelhafen@unibas.ch), Institut für Physik der Universität Basel : ***Consequences of the plasma-wall interactions in ITER for the lifetime of metallic mirrors planned for diagnostic systems***. RA.

Références

- [3] Site internet *JET* : <http://www.jet.efda.org>
- [4] Site internet *ITER* : www.iter.org Informations sur l'histoire et l'avancement du projet *ITER*.
- [5] Site internet *EFDA* : www.efda.org Informations sur la recherche européenne dans le domaine de la fusion
- [6] Référence disponible sous : <http://interstices.info/plasma>

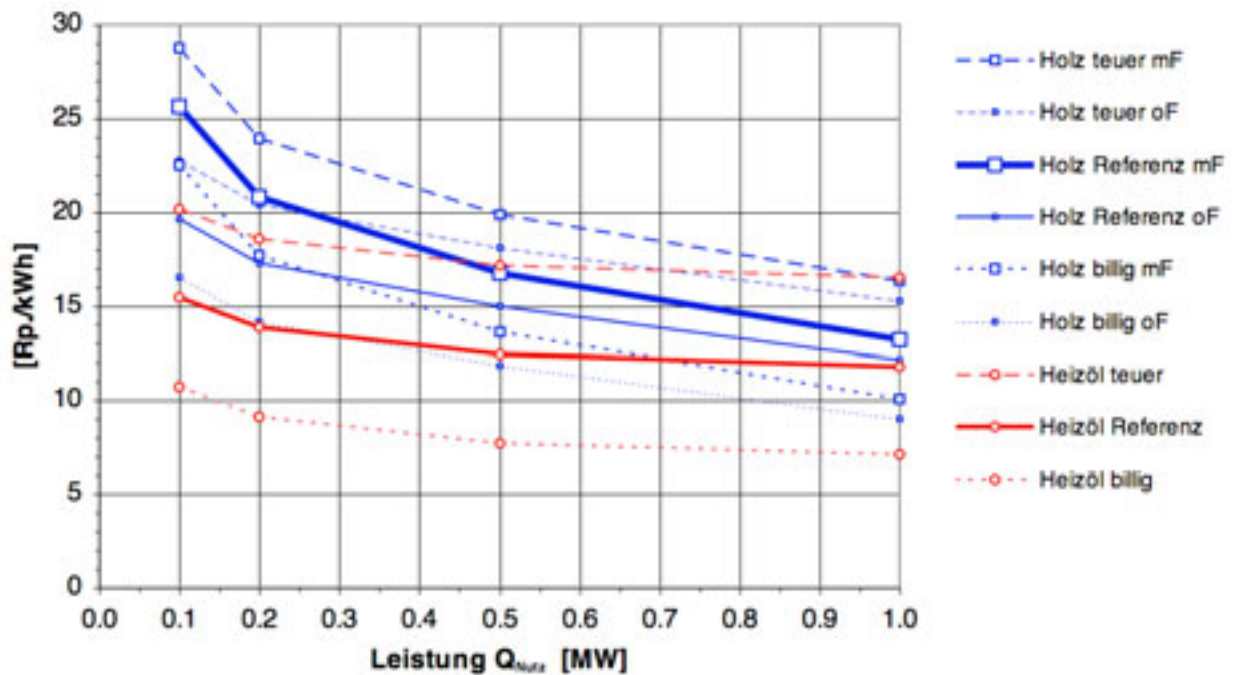
Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN

Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2006

PROGRAMM ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Lukas Gutzwiller

lukas.gutzwiller@bfe.admin.ch



Wärmegestehungskosten mit Holz und Heizöl

Grosse Anlagen ohne Feinstaubabscheidung produzieren Wärme aus Holz derzeit praktisch gleich teuer wie aus Heizöl, eine Feinstaubabscheidung verteuert die Anlage aber um knapp 10%.

oF = ohne Feinstaubabscheider,

mF = mit Feinstaubabscheider.

Holzpreis teuer, Referenz, billig: 7,5 / 5 / 2,5 Rp./kWh

Heizölpreis teuer, Referenz, billig: 12 / 8 / 4 Rp./kWh

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 als auch für die längerfristige Ausrichtung der Energiepolitik. Es dient somit der Erarbeitung neuer und der Überprüfung bestehender Instrumente. Die Forschungsergebnisse des Programms kommen zudem den Kantonen sowie verschiedenen Verbänden und Organisationen zugute (siehe auch [18]).

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. Die Energieproduktion (Umwandlungssektor) hat dabei eine Querschnittsfunktion. Dazu kommen die Energieperspektiven (www.energie-perspektiven.ch), sowie der Technologietransfer.

Seit dem Beginn der Arbeiten zu den **Energieperspektiven 2035/2050** im Jahr 2003 konnte im Frühjahr 2006 zum zweiten Mal ein Bündel von acht neuen Projekten ausgeschrieben werden. Bei den abgeschlossenen Projekten ist jenes zu den Grenzkosten bei Bürogebäuden speziell hervorzuheben, da es als Grundlage für Kosten-Nutzen Überlegungen im Dienstleistungssektor dient.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2006

GEBÄUDE UND ELEKTROGERÄTE

Im Anschluss an das Projekt *Grenzkosten im Bereich Wohngebäude* (siehe Schlussbericht [18]) wurden in einer zweiten Phase die ***Grenzkosten bei forcierten Energieeffizienzmassnahmen und optimierter Gebäudetechnik bei Wirtschaftsbauten*** [1] untersucht. Die Studie liefert aktuelle Erkenntnisse zu den Kosten von Energieeffizienz-Massnahmen für die wichtigsten Kategorien von Wirtschaftsbauten und gibt Handlungsempfehlungen zuhanden der relevanten Akteure wie Investoren und Planer von Neubauten, Betreiber und Besitzer von bestehenden Gebäuden, sowie zuhanden der Baubranche im Bereich Gebäudehülle und Gebäudetechnik sowie der energietechnischen und wirtschaftlichen Forschung.

Im Bereich der Wirtschaftsbauten bestehen ähnlich grosse und kostengünstige Energie-Effizienzpotentiale wie bei den Wohngebäuden, aber aufgrund der komplexeren Gebäudehüllen und der vielfältigeren Nutzung auch Unterschiede. Das Projekt hat deshalb zum Ziel, die Grenz- und Durchschnittskosten für die Anwendung energieeffizienter Massnahmen (Wärmeschutz sowie Heizungs- und Lüftungstechnik) für die wichtigsten Kategorien von Wirtschaftsbauten auf eine aktuelle empirische Basis zu stellen. Methodisch wurden innerhalb des komplexen Untersuchungsgegenstandes Schwerpunkte gesetzt und der Gebäudebestand hinsichtlich kosten- und energierelevanter Unterschiede kategorisiert. Zudem wurde ein Raster für die zu erhebenden Kostenelemente sowie für die durchzuführenden energetischen Berechnungen erstellt.

Neubau, Instandsetzung und Erneuerung bestehender Gebäude erfolgen heute meist mit dem Ziel, die Investitionskosten möglichst gering zu

halten. Diese Minimierung der Investitionskosten steht aber meist in Konflikt mit der Minimierung der Lebenszykluskosten und damit der Energieeffizienz-Massnahmen. Bei Neubauten wie Büro- oder Gewerbegebäuden können sowohl bei Neubauten als auch bei bestehenden Gebäuden das Komfortniveau, der Brennstoffbedarf und der gebäudebezogene Elektrizitätsbedarf durch geeignete Massnahmen erheblich verbessert respektive vermindert werden. Für eine markante Reduktion des gesamten Strombedarfs muss dabei auch der Elektrizitätsverbrauch der Bürogeräte einbezogen werden. Die grössten Auswirkungen auf die Jahresenergiekosten haben Installationen zur Erhöhung des Komforts (aktive Kühlung, Lüftung) oder grundsätzliche architektonische Entscheide (z.B. Fassadentyp, architektonisches Design).

Bei den Investitionsentscheiden zu energieeffizienten Massnahmen wird deren positiver Zusatz-Nutzen jedoch viel zu wenig beachtet. Vergleicht man die jährlichen Vollkosten der energierelevanten Bauteile und Anlagen (50 bis 100 CHF/m² pro Jahr) mit den gesamten Kapital- und Betriebskosten (300 bis 400 CHF/m² pro Jahr) und den Personalkosten (5000 bis 10'000 CHF/m² pro Jahr), zeigt sich, dass hier am falschen Ort gespart wird. Wenn die in den Wirtschaftsgebäuden arbeitenden Menschen durch überhitzte oder unterkühlte Räume oder unzureichende Luftqualität leiden hat dies einen direkten Einfluss auf die Arbeits-Produktivität und damit auf die grösste Kostenstelle.

Das Ziel des Projekts ***Instrumente für Energieeffizienz im Strombereich*** [2] 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 sind:

Zur Erreichung der Stromreduktions-Ziele ist ein *Instrumenten-Mix* einzusetzen. Dieser sollte - abgesehen von einer Energie- bzw. Stromlenkungsabgabe - Vorschriften und Labels, einen nationalen Stromsparfonds, die Verpflichtung der EVU (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 Stromsparfonds* eingerichtet werden. Bei Bedarf kann dieser Fonds zu einem späteren Zeitpunkt zu einem umfassenden Energieeffizienz-Fonds weiterentwickelt werden. Der Stromsparfonds zielt durch gesamt-schweizerische Effizienz-Programme auf Förderung der einzelnen Technologien und Anwendungen und Sensibilisierung sowie Aufbau von Wissen bei Marktteilnehmern ab.

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 Stromsparfonds beteiligen können.

Im Projekt **gesetzliche Umsetzungsmodelle des Gebäude-Energieausweises** [3] geht um die Analyse der Grundlagen für einen privat- oder öffentlich-rechtlichen Vollzug eines Gebäudepasses. In der EU wird ein Energieausweis für Gebäude (auch Energiepass genannt) eingeführt. Dieser muss für Neubauten, bei Verkauf oder Vermietung vorgelegt werden. Für die Schweiz besteht zwar kein Zwang zur gesetzlichen Einführung eines Gebäude-Energieausweises, dennoch lohnt es sich, über dessen Einführung zu diskutieren, da bei bestehenden Bauten das Energiesparpotential besonders hoch ist. Im Projekt werden

Vorschläge für die Einführung und den Vollzug eines Energieausweises erarbeitet. Diese sollen mithelfen, einen Entscheid für oder gegen die Einführung eines Energieausweises in der Schweiz zu fällen.

Die Autoren der Studie kommen zum Schluss, dass mit einem konsequenten Einsatz des Energieausweises die Motivation der Eigentümer zur Realisierung von Sanierungen steigt und so substanzielle Wirkungen erzielt werden können. Aus ihrer vergleichenden Untersuchung von drei möglichen Vollzugsstrategien (1. obligatorischer Energieausweis auf Basis des Energierechts, 2. obligatorischer Energieausweis auf Basis des Privatrechts und des öffentlichen Rechts, 3. Freiwilliger Vollzug gekoppelt mit Fördermitteln) leiten die Autoren die Empfehlung ab, den Gebäudeenergieausweis in der Schweiz vorerst auf freiwilliger Basis einzuführen. Ab 2010 könnte gleichzeitig mit dem Inkrafttreten der überarbeiteten *Mustervorschriften der Kantone im Gebäudebereich (MuKE)* die rechtliche Verankerung und der Vollzug eines obligatorischen Energieausweises erfolgen.

In der Vorstudie **Erhebung von Energiekennzahlen von Wohnbauten** [4] soll abgeklärt werden, wie die Energiekennzahlen von Gebäuden mit Baujahr vor 1980 zuverlässig und dennoch kostengünstig erhoben werden können. In einer ersten Phase sollen bestehende Erhebungen zu Energiekennzahlen 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 mindestens vier Datengrundlagen der Kantone ZH, GR, GE und BS zur Verfügung.

Wie erwartet hat sich in der Berichtsperiode gezeigt, dass der Parameter Energiebezugsfläche wegen den unterschiedlichen Erhebungsmethoden (Gebäudeversicherung, Konzessionäre, Gebäudeschätzer etc.) mit grossen Unsicherheiten verbunden ist, weshalb die Daten aus den vier Kantonen nicht direkt vergleichbar sind. Um die Daten möglichst vergleichbar zu machen, werden die Energiebezugsflächen aus dem Gebäude- und Wohnregister des BFS verwendet und darauf basierend die Energiekennzahl für repräsentative Bauten berechnet.

Das **Potenzial, Wirtschaftlichkeit und Förderinstrumente für Abwasserwärmenutzung** [5] wird in einer Studie untersucht, in welcher auf bestehenden Kanalisationsplänen und auf zur Sanierung anstehender Gebäude/Quartiere abgestützt wird. Auch die bereits bestehenden Potenzialabschätzungen der Gemeinden sollen mit einem einheitlichen Kriterienraster ausgewertet werden. Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse sollen

die bisher realisierten Projekte untersucht werden und eine Typisierung erstellt werden. Folgende provisorische Folgerungen können abgeleitet werden:

- Abwärme von ARA konkurriert mit Wärme aus Grundwasser; zudem sind die ARA relativ weit weg von Wohngebäuden gebaut, was ein grosses Fernwärmenetz bedingt.
- zwischen Abwärme aus Klärbecken und Kanalabwärme muss unterschieden werden; letztere ist eher teurer und es bestehen offene Fragen, z.B.: wie stark darf Wasser abgekühlt werden? gibt es Verunreinigungen?
- eine gute Planung ist wichtig. Die wirtschaftlichen Kennzahlen streuen sehr stark.

ENERGIEFORSCHUNG UND TECHNOLOGIE-TRANSFER

Das Projekt *Innovationsprozesse für Energietechnologien* [6] soll folgende Fragen beantworten: (a) Wie findet die Wissensdiffusion von Teilgebieten in die Industrie statt? Durch welche Massnahmen könnte der Wissenstransfer verbessert werden? Wie ist die Forschungsförderung im Vergleich zwischen KMU und multinationalen Unternehmungen strukturiert? Könnte der Wissenstransfer an Hochschulen verbessert werden? (b) Welche privaten Finanzierungsmöglichkeiten bestehen für den Technologietransfer (Risikokapital, Risk-Pooling, Projektfinanzierung)? Wie gehen die privaten Finanzinstitute vor, um innovative Projekte zu identifizieren und zu unterstützen? Ist bei Innovationsprojekten mit KMU die Sorgfaltspflicht und Kreditprüfung für die privaten Geldgeber zu aufwändig? Bräuchte es dabei staatliche Beihilfe analog zur Exportrisikogarantie oder Bürgschaften? Können die bestehenden staatlichen Instrumente verbessert werden? In der Berichtsperiode wurde entschieden, sich bei der Analyse auf Photovoltaik, Wechselrichter, Biomasse-Vergasung und effiziente Tumbler zu fokussieren:.

Die Studie *Finanzierungsansätze für erneuerbare Energien in Europa* [7] befasst sich mit den in ausgewählten Ländern verfügbaren Finanzinstrumenten für Projekte zur Förderung der erneuerbaren Energien. Im Vordergrund stehen heute 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 Standortförderung, Start-Up Unterstützung oder generell der Unternehmensförderung 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 Kapitaldienstleistungen erfährt. Die zwei betrachteten Finanzierungsvarianten unterscheiden sich wegen der Bonität des jeweiligen 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 5 Jahre. Entsprechend haben Promotoren mit höherer Bonität, wie z.B. Elektrizitätswerke und Grossfirmen einen entscheidenden Kostenvorteil, selbst bei identischen Projektverhältnissen. 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 in der Nähe der Schweizer Verhältnisse sind. Die Marktreife dient als Sammelindikator für politische, wirtschaftliche und technische Rahmenbedingungen. Die Technologien Biogas, Solarenergie, Geothermie, Kleinwasserkraft und die Länder Frankreich, Österreich, Dänemark, Deutschland, Norwegen, Slowenien, Belgien und die Schweiz werden näher analysiert.

In der Schweiz ist die Auswahl an Banken, die sich für eine Finanzierung von Projekten mit Investitionskosten von kleiner als 10 Mio. Fr. anbieten, eher klein. Pluspunkte bei der Finanzierung sind die unkomplizierte und pragmatische Abwicklung innerhalb nützlicher Frist. Vor allem solide Versicherungsmöglichkeiten bis hin zu privaten Sicherheiten des Initianten bewegen Banken zur Kreditvergabe. Blankokredite und reine Cash-Flow basierte Projektfinanzierungen mit Investitionsvolumen kleiner als 10 Mio. CHF und/oder separater Rechtspersönlichkeit sind praktisch nicht zu finden. Die unsicheren Rahmenbedingungen (Einspeisetarife, Bewilligungspraxis) tragen dazu bei, dass sowohl Eigenkapitalgeber als auch Fremdkapitalgeber zurückhaltend sind und v.a. die Laufzeiten der Kredite einiges geringer sind als in anderen Ländern.

Das Projekt *Devising a rule for the efficient allocation of research funds by CORE* [8] wurde anfänglich von der eidgenössischen Energieforschungskommission CORE mit dem Ziel lanciert, durch Anwendung der Portfolioanalyse effiziente Energieforschungsprojekte für die Schweiz zu bestimmen. Während der dreijährigen Projektarbeit wurde allerdings auf Wunsch der Begleitgruppe der Forschungsschwerpunkt verändert, sodass sich die Portfolioanalyse letztendlich ausschliesslich auf effiziente Energietechnologien zur Stromerzeugung konzentrierte.

Es wurden dabei zwei Perspektiven unterschieden, diejenige eines Investors und diejenige eines Benutzers in der laufenden Periode. Ein Investor sucht (wie im Kapitalmarkt) das Portfolio mit der

maximalen Zunahme der Rendite bei gegebenem Risiko. Unter dem Risiko ist die Standardabweichung der Veränderung in der Rendite im Sinn von kWh/CHF zu verstehen. Für einen speziell risikoaversen Investor wurde zudem jenes effiziente Portfolio mit dem minimalen Risiko bestimmt. Ein Benutzer während der laufenden Periode hingegen ist am aktuellen Wert der Rendite und des Risiko interessiert.

Die Datengrundlage für die Untersuchung stammt von diversen Schweizer Stromerzeugern, aber auch aus veröffentlichten Studien und Zukunftsprognosen. Die historische Beobachtungsperiode umfasst die Jahre 1985 bis 2003, und bezieht sich auf *Nuklear*, *Laufkraft*, *Speicherkraft* und *Solar*. Die Zukunftsperiode reicht von 2005 bis 2035 und enthält zusätzlich *Gas* als Energieträger. Alle Zeitreihen enthalten als Varianten auch kalkulatorische Zuschläge für externe Kosten. Aufgrund der Tatsache, dass so genannte Schocks (wie z.B. Stromausfälle, die durch eine Hitzwelle ausgelöst werden) die Rendite aller Technologien beeinflussen, wurde ein *SURE (Seemingly Unrelated Regression Estimation)* Verfahren angewendet, welches es ermöglicht, die systematischen Korrelationen herauszufiltern.

Folgende Resultate konnten ermittelt werden: Das aus der Investorperspektive effiziente Portfolio würde zur Zeit (2003) überwiegend aus *Solar* bestehen. Da dieses Ergebnis als unrealistisch gelten muss, werden Obergrenzen für die Marktanteile erneuerbarer Energien eingeführt. Dann aber besteht im Jahr 2003 sowohl für risikoaverse Investoren als auch für Benutzer das effiziente Portfolio aus folgenden Technologien: 40% *Nuklear*, 32% *Speicherkraft*, 24% *Laufkraft* und 4% *Solar*. Für das Jahr 2035 wurden keine solchen Obergrenzen eingeführt, sodass folgendes effizientes Portfolio für stark risikoaverse Investoren ermittelt werden konnte: 10% *Nuklear*, 77% *Laufkraft* und 13% *Gas*. Im Vergleich dazu würden zukünftige Nutzer besser fahren, wenn der Strom-Mix im Jahre 2035 aus 32% *Laufkraft*, 6% *Speicherkraft*, 53% *Solar* und 9% *Gas* bestehen würde. Sowohl Investoren als auch Benutzer dieser stromerzeugenden Technologien würden in Zukunft durch einen stärkeren Einsatz von *Gas* und einer Reduktion von *Nuklear* profitieren. Aus Sicht des Wettbewerbs haben die ermittelten effizienten Portfolios allerdings den Nachteil, dass es zu einer Konzentration der verwendeten Energieträger kommen würde, was die Versorgungssicherheit gefährden könnte.

VERKEHR

Das Projekt **Autoklassen-Wechselverhalten** [9] untersucht die mögliche Beeinflussung durch Lenkungsabgaben beim Neuwagenkauf. Die wohl wichtigste Konsumentenentscheidung bezüglich

CO₂-Emissionen des Strassentransports ist der Neuwagenkauf. Er legt den Treibstoffverbrauch für im Mittel 160'000 Fahrzeugkilometer unwiderprüflich fest. Denn ungeachtet seines Treibstoffverbrauchs wird jedes Auto bis zum Ende der technisch-wirtschaftlichen Lebensdauer gefahren und wechselt dabei im Schnitt mehrmals den Besitzer. Es besteht ein Verbrauchsunterschied von ca. 50% zwischen dem Kauf des effizientesten und einem nicht-effizienten Mittelklasse-PW gleicher Funktionalität bezogen auf Anfang 2005. Über die Gesamtfahrleistung eines PW berechnet, entspricht dies einer Differenz von 10 t CO₂. Die Untersuchung des individuellen Autokaufverhaltens spielt deshalb eine wichtige Rolle. Im vorliegenden Projekt sind die gegenseitige Abhängigkeiten von Autokaufverhalten und Bonus-Malus-Systemen im Fokus. Speziell untersucht wird die Frage, ob die Wirksamkeit von Bonus-Malus-Systemen durch unbeabsichtigte Nebeneffekte stark beeinträchtigt werden könnte, wenn Käufer geneigt wären, den zur Erlangung einer Bonuszahlung notwendigen Verzicht auf Leistung durch ein Mehr an Autogrösse zu kompensieren. Das Potential zum Wechsel der Autoklasse ist stark abhängig von der gewählten Definition der Energie-Etikette.

Die Angabe des absoluten Verbrauchs ist in der EU bei Neuwagen zwingend vorgeschrieben (Richtlinie 1999/94/EG), die zusätzliche Einordnung des Neuwagens mittels Effizienzklassen ist aber freiwillig und wird von den EU-Mitgliedstaaten unterschiedlich gehandhabt: Vier Länder haben Effizienzklassen basierend auf der absoluten CO₂-Emission eingeführt, zwei Länder stellen den CO₂-Ausstoss in Relation zu einem Nutzen des Autos, unter Verwendung der Grundfläche (Länge mal Breite) als Surrogat. Die übrigen EU-Mitgliedstaaten verzichten auf Effizienzklassen. Im Vergleich zu den EU-Mitgliedstaaten ist die schweizerische Energie-Etikette sowohl deutlich relativer als auch stärker am Angebot anstelle des Absatzes orientiert (die Effizienzklassen A und B machen ca. 40% des Absatzes aus, in EU-Ländern mit Effizienzklassen ist dieser Anteil stets unter 20%). Zurzeit kennen überdies drei EU-Mitgliedstaaten Bonus-Malus-Systeme oder haben deren Einführung in der nahen Zukunft beschlossen. Alle drei Staaten sehen nur die Förderung einer kleinen Anzahl Neuwagenmodelle vor; in Belgien und Grossbritannien kommen je ca. 21 Neuwagenmodelle für Prämien überhaupt in Frage, in den Niederlanden ist dies noch nicht genau festgelegt. Belgien und Grossbritannien, stellen auf die absolute CO₂-Emission ab, die Niederlande verwenden ein Hybridsystem (25% absolute CO₂-Emission, 75% relative CO₂-Emission).

Die Simulationsergebnisse des Projekts zeigen, dass eine Abschwächung der Relativität der heutigen Bewertungszahldefinition, entweder mittels Exponenten kleiner als 1 für das Leergewicht,

oder mittels Obergrenze für das berücksichtigte Leergewicht, zu einer höheren Effizienz für Bonus-Malus-Systeme führen würden. Eine vollständig am absoluten CO₂-Ausstoss orientierte Bewertungszahldefinition scheint hingegen weniger wirksam zu sein. Das Optimum sollte also zwischen der heutigen Definition und einer absoluten Bewertungszahl liegen. Basierend auf diesen Resultaten konnte die *EnergieEtikette* (www.bfe.admin.ch/energie/00588/00589/00644/index.html?lang=de&msg-id=5549) angepasst werden.

Das Forschungsprojekt hat zunächst die mögliche Anpassung der Bewertungszahl untersucht. Allerdings ist die Klassifizierungsregel (für die Effizienzklassen) für den Erfolg eines Bonus-Malus-Systems in der Schweiz möglicherweise wichtiger als die Definition der Bewertungszahl. Gegenwärtig ist namentlich die Klasse A recht gross. Dies führt zu grossen Mitnahme-Effekten. Wie die Untersuchung zeigt, scheinen die Käufer mit einer Präferenz für kleine Autoklassen eher bereit zu sein, den mit einer Lenkungsabgabe angestrebten Wechsel auf einen kleineren Motor bzw. ein kleineres Modell zu vollziehen. Je grösser die präferierte Autoklasse desto eher stimmen die Befragten dagegen den nicht beabsichtigen Reaktionsmöglichkeiten zu, für eine Prämie zu einer grösseren Autoklasse zu wechseln oder die Prämie für Zusatzoptionen zu verwenden. Bei einer künftigen Ausgestaltung der Energie-Etikette für ein Bonus-Malus-System scheint im Hinblick auf die Wirkung wichtig, zuerst zu beschliessen, wie hoch die Bonuszahlungen für die Klasse A und für die Klasse B sein sollten. Erst anschliessend sollten die Klassengrenzen der Effizienzklassen definiert werden, so dass die vorhandenen Mittel vollständig ausgeschüttet würden.

UMWANDLUNGSSEKTOR (ERNEUERBARE ENERGIEN UND MARKTORDNUNG)

Im Projekt *Wirtschaftlichkeit von Biomasse-Energieanlagen* [10] werden die wirtschaftlichen Kenngrössen anhand bestehender Anlagen erhoben und analysiert. Das Projekt soll Grundlagen für die Erstellung einer Biomasse-Energie Strategie liefern, welche zur Aktualisierung der nicht-amortisierbaren Mehrkosten im harmonisierten Fördermodell (Globalbeiträge an die Kantone) verwendet wird. Zudem kann die Studie als Ausgangsbasis für die kostendeckenden Einspeisetarife von Biomasse-Energieanlagen verwendet werden. Im ersten Schritt wurden die zu analysierenden Anlagentypen präzisiert und ausgewählt, die Systemgrenzen und die grundlegenden Rahmenbedingungen festgelegt. Es werden landwirtschaftliche und gewerblich-industrielle Biogasanlagen, Holzheizanlagen ab einer Leistung von 100kW und Holz-WKK Anlagen sowie Anlagen zur Herstellung von Biotreibstoff untersucht.

Als Resultat kann festgehalten werden, dass die Wärmeproduktion aus Holz für grosse Anlagen ohne Feinstaubabscheidung derzeit praktisch gleich teuer ist wie Wärme aus Heizöl. Eine Feinstaubabscheidung verteuert die Anlage aber um knapp 10%. Die Stromgestehungskosten der untersuchten landwirtschaftlichen Biogasanlagen sind sehr unterschiedlich, was auf ein Optimierungspotenzial hindeutet. Die Wirtschaftlichkeit wird insbesondere durch die Einnahmen aus Abfallentsorgungsgebühren und durch die Wärmenutzung beeinflusst. Für Anlagen zur Herstellung von Flüssigtreibstoff ist die Datengrundlage sehr klein, so dass auf ausländische Daten zugegriffen werden musste. Zudem ist hier zu berücksichtigen, dass die Rohstoffe (beispielsweise Ölsaaten) finanziell gestützt werden. Aus den Ergebnissen der Studie wurde für jede untersuchte Anlage ein Factsheet erstellt.

Als Basis für eine verbesserte und zielgruppenspezifische Marktbearbeitung zur Förderung erneuerbarer Energien umfasst das Projekt **Potenzial der Erneuerbaren Energien für bestehende Nahwärmenetze** [11] folgende Zielsetzungen:

- Bestimmen des Marktvolumens der Nahwärmenetze
- Identifikation der nötigen Hilfsmittel für eine Umrüstung zu Handen der Entscheidungsträger
- Identifikation von technischen und administrativen Hindernissen
- Vergleich der Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu konventionellen Energieträgern

Die Studie kommt zum Schluss, dass das Substitutionspotenzial der erneuerbaren Energien beim Einsatz fossiler Feuerungen beträchtlich ist: Aufgrund der Altersverteilung und der durchschnittlichen Lebensdauer der Anlagen ist ab 2010 mit einem Ersatz von über 500 Anlagen pro Jahr zu rechnen. Diese weisen einen jährlichen Energiebedarf von 400 bis 500 GWh auf, der neu durch Holzenergie oder Umgebungswärme gedeckt werden könnte. Um dieses Substitutionspotenzial zu nutzen, präsentieren die Autoren verschiedene Marketingmassnahmen.

Die in Zusammenarbeit mit dem Verband der Schweizerischen Gasindustrie (VSG) verfasste **Analyse zum Erdgasmarkt Schweiz** [12] untersucht den Bedarf einer Öffnung des Erdgasmarktes in der Schweiz sowohl aus Sicht der Verbraucher als auch aus Sicht der Erdgasindustrie. Neben der Aufarbeitung der spezifischen technisch-ökonomischen Eigenheiten des Erdgasmarktes insbesondere im Vergleich mit der Stromwirtschaft wurden auch die Erfahrungen mit der Gasmarktöffnung in ausgewählten EU-Ländern untersucht. Anhand einer Umfrage bei Haushalten und Unternehmen und Expertengesprächen mit Erdgas-Versorgungsunternehmen

und Grossverbrauchern wurde schliesslich die Beurteilung der heutigen Situation erfasst sowie das bei einer Markttöffnung zu erwartende Verhalten der Verbraucher ermittelt. Im Rahmen der Umfrage wurde – erstmals in der Schweiz – mittels Marktexperimenten die Zahlungsbereitschaften für ausgewählte Eigenschaften eines Erdgas-Liefervertrags ermittelt.

Die Ergebnisse der Studie lassen sich wie folgt zusammenfassen: Bei einer Markttöffnung sind spezifische Eigenheiten des Erdgasmarktes im Vergleich zum Strommarkt zu berücksichtigen. Die Expertengespräche haben gezeigt, dass sich die Versorgungsunternehmen auf eine Markttöffnung vorbereitet fühlen und dass die erwarteten Auswirkungen einer Markttöffnung auf die Struktur der Branche und der Effizienz der Unternehmen als eher gering betrachtet werden. Der grösste Teil der Haushalte und der Unternehmen ist mit ihrem bisherigen Versorgungsunternehmen sehr zufrieden und schätzt die Versorgungsqualität als sehr hoch ein. Eine freie Lieferantenwahl würde sowohl von den Haushalten als auch von den Unternehmen begrüsst. Effektiv dürften jedoch nur wenige Verbraucher nach einer Markttöffnung den Lieferanten wechseln. Dies lässt sich aus den internationalen Erfahrungen ableiten. Zudem zeigen die Marktexperimente, dass die geforderten Preisreduktionen für einen Anbieterwechsel sehr hoch sind (Preisrabatte zwischen 18% für die Haushalte und 29% für die Unternehmen). Die Versorgungssicherheit ist ein zentrales Anliegen und zeichnet sich durch eine hohe Zahlungsbereitschaft aus. Die ermittelten geforderten hohen Preisnachlässe dürfen aber nicht über die Tatsache hinweg täuschen, dass sich diese je nach Kundengruppen teilweise stark unterscheiden. Der Erdgasmarkt Schweiz ist bereits teilweise geöffnet. Schon heute können ausländische Erdgasanbieter hiesige Kunden bedienen. Doch die Gasmärkte in den EU-Mitgliedstaaten sind weder für die Kunden zufrieden stellend liberalisiert, noch kann ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Liberalisierungsgrad und der Versorgungssicherheit hergestellt werden.

Die Untersuchung **Rahmenbedingungen für Gaskraftwerke in Europa** [13], liefert vor dem Hintergrund der Diskussion über mögliche Gaskraftwerke in der Schweiz Erkenntnisse zu den existierenden Rahmenbedingungen. In den betrachteten Ländern machen der Umgang mit den CO₂-Emissionen und der Zuteilungspraxis von Zertifikaten sowie die Anforderungen an die Abwärmenutzung die grössten Unterschiede aus.

Das Projekt **Auswirkungen langfristig hoher Öelpreise** [14] hat einerseits Szenarien mit hohen Ölpreisen (80 bis 140 \$ pro Fass) und andererseits Szenarien mit drastischen Mengenverknappungen in Form eines in den Jahren 2010 bzw.

2020 erreichten Gipfels der Weltölförderung in die Betrachtung einbezogen. Die Wechselwirkungen der internationalen Märkte mit der Schweiz werden unter diesen Annahmen quantitativ simuliert und diskutiert. Die untersuchten Energiepreis- und -mengenszenarien enthalten keine politischen Massnahmenpakete.

Die ausgewiesenen Ergebnisse basieren auf langfristigen ökonomischen Gleichgewichten. Eher kurzfristige Aspekte, wie der derzeitige Investitionsrückstand in der Ölindustrie oder das Überschiessen der Märkte aufgrund psychologischer Effekte, sind nicht berücksichtigt. Nicht Konjunktur, sondern Struktur und langfristige Entwicklungen stehen im Zentrum der Betrachtung. Aus dem Gesamtbild der verschiedenen mit dem dynamischen Mehrländergleichgewichtsmodell *MultiSWISSEnergy* berechneten Szenarien lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen herauslesen.

Rohölpreise über 100 \$ (in \$ von 2001 pro Fass) werden langfristig nur unter extremen Annahmen erreicht. Selbst sehr pessimistische Annahmen zu den Ölreserven führen trotz des unterstellten Weltwirtschaftswachstums von 3% pro Jahr nicht in diesen Preisbereich. Diese Studie kann allerdings keine Aussagen über die Wahrscheinlichkeit kurz- und mittelfristiger Ölpreisvolatilitäten machen, die grundsätzlich auch in den dreistelligen Preisbereich führen könnten. Als langfristiger Gleichgewichtspreis sind Ölpreise von über 100\$ jedoch unwahrscheinlich, weil perfekte und weniger perfekte Substitute (vor allem Ethanol und Methanol sowie Strom aus erneuerbaren Quellen wurden untersucht) und Effizienzverbesserungen zu niedrigeren Kosten zur Verfügung stehen. Hohe Ölpreise senken die globalen CO₂-Emissionen zwar kurzfristig, langfristig stellt aber die Substitution von Öl durch Kohle bzw. durch kohlebasierte Brenn- und Treibstoffe eine erhebliche Gefahr für das Klima dar, solange sich CO₂-Abscheidung und -Speicherung nicht als wesentlich praktikabler und günstiger erweisen als im Bericht auf der Basis von IPCC-Quellen unterstellt. CO₂-Abscheidung und -Speicherung können zwar bei kohlebasierten Grossanlagen, die in der Nähe geeigneter Lagerstätten liegen, einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. In den simulierten Szenarien ist dieser Beitrag aber gering, und es bedarf dazu klarer klimapolitischer Anreize oder Vorschriften. Die Verflüssigung von Kohle zu Methanol ist – energetisch betrachtet – ein unsinniger Weg, der nur in Erwägung gezogen wird, weil der Verkehr und die Wärmebereitstellung heute vorwiegend auf flüssigen Treib- und Brennstoffen basiert.

Ziel des Projekts **Bewertung von Wiederherstellungs- und Ersatzmassnahmen bei der Konzessionierung von Wasserkraftanlagen** [15] ist die Erarbeitung einer methodischen Grundlage,

mit welcher die unterschiedlichen Interessenlagen dargestellt, allfällige Interessenkonflikte ermittelt und im Rahmen der gesetzlich vorgesehenen Interessenabwägung transparent und mit grösstmöglicher Objektivität beurteilt werden können. Insbesondere soll eine möglichst allgemeine und objektive Darstellungs- und Bemessungsgrundlage für Ersatz- und Ausgleichsmassnahmen erstellt werden. Monetarisierende Ansätze (nicht im Sinne absoluter Bewertungen, sondern im Sinne der Schaffung einer Vergleichs- und Bemessungsbasis) können verglichen werden. Die Bemessungsgrundlage orientiert sich wesentlich an den bisherigen Erfahrungen.

In der Berichtsperiode wurde folgendes Vorgehen vereinbart: Das vorliegende Projekt nimmt den gesetzlichen Rahmen als gegeben. Empfehlungen zu Gesetzesänderungen werden nur in den Schlussfolgerungen gemacht, wo diese sich aufdrängen. Zur Bewertung der SWE-Massnahmen (SWE = Schutz-, Ersatz- und Wiederherstellung) werden Ansätze, die auf Monetarisierung basieren und Nutzwertanalysen sowie Multikriterienanalysen verfolgt. Werden Geldwerte ermittelt, wird in jedem Fall die Methodik offen gelegt.

Das Ziel der Studie **Empirische Erfahrungen mit Ökosteuern in Europa** [16] 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. Welche Evaluationen

von Energieabgaben wurden mit welchen Methoden durchgeführt?

Als erster Schritt wird für das Projekt eine Zusammenstellung der bestehenden und geplanten Ökosteuern in den europäischen Ländern und deren Ausgestaltung erstellt werden. Dabei stehen sowohl Lenkungsabgaben und Zertifikatehandel als auch Förderabgaben (Energieabgaben, welche zur Förderung von Erneuerbaren und Energieeffizienz eingesetzt werden) im Vordergrund. Zudem muss zwischen Steuern auf Brenn- und Treibstoffen, sowie Elektrizität unterschieden werden. Bezüglich der Ausgestaltung muss zwischen Besteuerung von Energie und Emissionen, sowie zwischen Primär- und Endenergie unterschieden werden. Im zweiten Schritt des Projekts ist die Auswertung der Erfahrungen mit Ökosteuern in den verschiedenen europäischen Ländern durchzuführen. Welcher Lenkungseffekt konnte beispielsweise mit der Ökosteuer auf Treibstoffen in Deutschland erreicht werden? Welche Auswirkungen haben Ökosteuern auf die Lohnnebenkosten und somit auf die Beschäftigung? Welchen Effekt haben Ökosteuern auf die Anwendung von neuen Technologien nicht nur auf der Nachfrageseite sondern auch auf der Inputseite? Wird dadurch ein Pull-Effekt für Forschung- und Entwicklung erzeugt? Führt die Einführung der Ökosteuer zu einer Vereinfachung des Steuersystems? Was ist der administrative Aufwand für die Erhebung und Rückverteilung? Welche haben sich als die zweckmässigsten Rückverteilmechanismen erwiesen? Welche Methoden und Modelle sind für obige Evaluationen besonders geeignet?

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. Zentrales Anliegen ist der Einbezug und die Zusammenarbeit mit den Kantonen, insbesondere den kantonalen Energiefachstellen und den interessierten Fachverbänden in den Bereichen Stromversorgung und Bauen. 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 wurden die EWG Projekte in einer Special Session am Status-

Seminar der ETH *Energie- und Umweltforschung im Bauwesen* sowie an verschiedenen Energie-Apéros vorgestellt. Insbesondere Vorschläge zur gesetzlichen Umsetzung des Gebäudeenergieausweises [3] wurden in verschiedenen Foren unter Einbeziehung der Kantone diskutiert. Auch an der Tagung des Departements *Erfolgskontrolle* der kantonalen Energiefachstellen wurden mehrere EWG-Projekte vorgestellt. Der Bericht Grenzkosten bei Wirtschaftsbauten wurde zudem auf Wunsch aus der Romandie auszugsweise auf französisch zur Verfügung gestellt; dieser Bericht stellt eine interessante Grundlage für einen Leitfaden für Planer und Berater dar. Zudem wurden verschiedene EWG-Projekte in internationalen Wissenschaftsperiodika publiziert.

Internationale Zusammenarbeit

In diversen Projekten sind internationale Hochschulen oder Forschungsinstitute direkt beauftragt oder sie werden im Rahmen von einzelnen Projekten einbezogen. 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 Netzwerk der Energieagenturen geöffnet. 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. Die Berücksichtigung der internationalen Forschungsliteratur und der rege Austausch an Fachkongressen, in Zeitschriften usw. stellt dabei eine Selbstverständlichkeit dar.

Auf Ebene der EU ist innerhalb des sechsten Rahmenprogramms - wie für die technischen Forschungsprogramme - das Schwerpunktthema *sustainable energy systems* wichtig. Je nach Bedarf werden Schweizer Beteiligte im Rahmen von klar umschriebenen Aufgaben finanziell unterstützt. Beispielsweise wurden im Programm *Intelligent Energy Europe*, zu welchem an der EEDAL in London ein Workshop durchgeführt wurde (siehe <http://livegroup.co.uk/EEDAL>) zwei Schweizer Beiträge vorgestellt. 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 2006 und Ausblick 2007

Neben den Arbeiten zu den Energieperspektiven 2035/2050 war das Jahr 2006 geprägt durch den Abschluss der im Frühjahr 2005 ausgeschriebenen Projekte sowie der Neuausschreibung von acht neuen Projekten. Zudem hat das Programm EWG für das *Konzept der Energieforschung des Bundes 2008-2011* die künftigen Leitlinien zusammengestellt [17]. Forschungsschwerpunkte sind Fragen des Innovationsprozesses, der gesellschaftlichen Akzeptanz und methodischer Verbesserungen der Perspektivenmodelle. Diese

Schwerpunkte werden in Zusammenarbeit mit den Hochschulen untersucht. Im Jahr 2006 standen die Projekte zu Energieeffizienz und Biomassenutzung im Vordergrund. Zusammen mit den Kantonen konnte zudem die Erhebung von Energiekennzahlen von bestehenden Bauten vorangetrieben werden. Auch das Projekt zu den Auswirkungen eines hohen Ölpreises ist hervorzuheben. Eine grössere Ausschreibungsrunde ist für April 2007 geplant.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2006 vorhanden

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

- [1] M. Jakob (martin.jakob@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, U.P. Menti (Intep), A. Baumgartner, Amstein-Walthert, Zürich: **Grenzkosten bei forcierten Energieeffizienzmassnahmen und optimierter Gebäudetechnik bei Wirtschaftsbauten** (SB).
- [2] S. Hammer (stephan.hammer@infras.ch), Infras, Zürich, N. Peherstorfer, österreichische Energieagentur, Wien: **Instrumente für Energieeffizienz im Strombereich** (SB).
- [3] S. Rieder (stefan.rieder@interface-politikstudien.ch), A. Lienhard, Uni Bern: **Gesetzliche Umsetzungsmodelle des Gebäude-Energieausweises** (SB).
- [4] R. Dettli (reto.dettli@econcept.ch), S. Bade econcept, W. Baumgartner, A&W, Zürich: **Erhebung von Energiekennzahlen von Wohnbauten** (JB).
- [5] R. Rigassi (reto.rigassi@eicher-pauli.ch), S. Gutzwiller, H.-P. Eicher, Eicher+Pauli, Liestal: **Potenzial, Wirtschaftlichkeit und Förderinstrumente für Abwasserwärmenutzung** (JB).
- [6] A. Berwert (adrian.berwert@ruetter.ch), Rütter und Partner, Zürich, J. Markard, EAWAG, Dübendorf: **Innovationsprozesse für Energietechnologien** (JB).
- [7] P. Schwer (p.schwer@newenergyscout.com), New Energy Scout, Frauenfeld: **Finanzierungsansätze für erneuerbare Energien in Europa** (JB).
- [8] B. Krey und P. Zweifel (pzweifel@soi.unizh.ch), Sozioökonomisches Institut der Uni Zürich: **Devising a rule for the efficient allocation of research funds by CORE** (JB).
- [9] P. de Haan, (dehaan@env.ethz.ch), ETH Zürich: **Autoklassen-Wechselverhalten** (JB).
- [10] O. Schelske (oliver.schelske@ebp.ch), Ernst Basler und Partner, Zürich, und T. Nussbaumer, Verenum, Y. Membrez, Erep, H. Engeli, Engeli Engineering, Neerach: **Wirtschaftlichkeit von Biomasse-Energieanlagen** (SB).

- [11] R. Dettli (reto.dettli@econcept.ch), Econcept, Zürich, M. Kernen, Planair, La Sagne: **Potenzial der erneuerbaren Energien für bestehende Nahwärmenetze** (SB).
- [12] S. Vaterlaus (stephan.vaterlaus@plaut.ch), Plaut, Zürich, M. Finger, EPF Lausanne.: **Analyse zum Erdgasmarkt Schweiz** (SB).
- [13] C. Hugi (christoph.hugi@ebp.ch), J. Füssler, M. Sommerhalder, Ernst Basler und Partner, Zürich: **Rahmenbedingungen für Gaskraftwerke in Europa** (SB).
- [14] F. Vöhringer (vöhringer@ecoplan.ch), A. Müller, Ecoplan, Zürich, Ch. Böhringer, ZEW, M. Strubegger, IIASA, Wien: **Auswirkungen langfristig hoher Oelpreise** (JB).
- [15] W. Ott (walter.ott@econcept.ch), S. Bade, econcept, Zürich, J. Leimbacher, Büro Leimbacher, J. Hürlimann Aquaplus, Zug: **Bewertung von Wiederherstellungs- und Ersatzmassnahmen bei der Konzessionierung von Wasserkraftanlagen** (JB).
- [16] M. Peter (martin.peter@infras.ch), R. Iten, Infras, Zürich, H. Lückge, Ecologic, Berlin: **Empirische Erfahrungen mit Ökosteuern in Europa** (JB).

Referenzen

- [17] **Konzept der Energieforschung des Bundes**, ausgearbeitet durch die CORE, Mai 2007. Download unter <http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/index.html?lang=de>
- [18] **Internet-Seite des Programms Energiewirtschaftliche Grundlagen**: www.ewg.bfe.ch.

ANHANG / ANNEXE

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS / RÉPERTOIRE DES SIGLES

ÖFFENTLICHE FORSCHUNGSINSTITUTE / INSTITUTIONS PUBLIQUES DE RECHERCHE

BFH	Berner Fachhochschule
HTA	Hochschule für Technik und Architektur, <i>Biel, Burgdorf</i>
SHL	Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, <i>Zollikofen</i>
EMPA/	Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt /
LFEM	Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherches, <i>Dübendorf</i>
ZEN	Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit im Bauwesen
EPFL	École polytechnique fédérale de <i>Lausanne</i>
CRPP	Centre de recherches en physique des plasmas
ICP	Institut de chimie-physique
LA	Laboratoire d'automatique
LENi	Laboratoire d'énergétique industrielle
LESO-	Laboratoire d'énergie solaire et de physique du
PB	bâtiment
LMS	Laboratoire de mécanique des sols
ETHZ	Eidgenössisch Technische Hochschule <i>Zürich</i>
CEPE	Centre for Energy Policy and Economics
EEH	Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik
HBT	Institut für Hochbautechnik
IET	Institut für Energietechnik
IFG	Institut für Geophysik
IMES	Institut für mechanische Systeme
IMRT	Institut für Mess- und Regeltechnik
LAV	Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme
LTC	Labor für Technische Chemie
LTNT	Labor für Thermodynamik in neuen Technologien
MAVT	Departement für Maschinenbau und Verfahrenstechnik
PRE	Professorship in Renewable Energy Carriers
TFP	Thin Film Physics Group
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz
FHA	Fachhochschule Aargau, <i>Brugg-Windisch</i>
FHBB	Fachhochschule beider Basel, <i>Muttenz</i>
FHSO	Fachhochschule Solothurn, <i>Olten</i>
FHO	Fachhochschule Ostschweiz
HSR	Hochschule für Technik, <i>Rapperswil</i>
NTB	Hochschule für Technik, <i>Buchs</i>
SPF	Institut für Solartechnik der HSR
FHZ	Fachhochschule Zentralschweiz
HTA	Hochschule für Technik und Architektur, <i>Luzern</i>
HES-SO	Haute École Spécialisée de Suisse Occidentale
EIG-VD	Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, <i>Yverdon</i>
HEVs	Haute École Valaisanne, <i>Sion</i>
PSI	Paul Scherrer Institut, <i>Villigen</i>
ENE	Forschungsbereich Allgemeine Energie
FUN	Forschungsbereich Festkörperforschung mit Neutronen
LES	Waste Management Laboratory
LMN	Laboratory for Micro- and Nanotechnology
LTH	Laboratory for thermal-hydraulics
LWV	Laboratory for materials behaviour
NES	Forschungsbereich Nukleare Energie & Sicherheit
TEM	Forschungsbereich Teilchen und Materie

SUPSI	Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana, <i>Canobbio</i>
DCT	Dipartimento delle Costruzioni e del Territorio
LEEE	Laboratorio di energia, ecologia e economia
IST	Istituto Scienze della Terra
USI	Università della Svizzera italiana, <i>Lugano</i>
MecoP	Istituto di Microeconomia e economia Pubblica
	Università <i>Bern</i>
IBC	Institut für Biochemie
IAC	Institut für angewandte Chemie
	Université de <i>Genève</i>
CHIAM	Département de chimie minérale, analytique et appliquée
Cryst	Laboratoire de cristallographie
CUEPE	Centre universitaire d'études des problèmes de l'énergie
	Université de <i>Neuchâtel</i>
IMT	Institut de microtechnique
	Universität <i>Zürich</i>
SOZPSY	Sozialpsychologie
SOI	Sozialökonomisches Institut
ZFH	Zürcher Fachhochschule
ZHW	Zürcher Hochschule, <i>Winterthur</i>
HSW	Hochschule <i>Wädenswil</i>

NATIONALE ORGANISATIONEN / ORGANISATIONS NATIONALES

CORE	Commission fédérale pour la recherche énergétique / Eidgenössische Energieforschungskommission
BRENET	Building and Renewable Energies Network of Technology
CCEM	Competence Center for Energy & Mobility
ESC	Energy Science Center
KTi/CTI	Förderagentur für Innovation des Bundes / Agence de la Confédération pour la promotion de l'innovation

INTERNATIONALE ORGANISATIONEN & PROGRAMME / ORGANISATIONS & PROGRAMMES INTERNATIONAUX

COST	Coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique (UE)
EU / UE	Europäische Union / Union Européenne
EURATOM	European Atomic Energy Community
EUREKA	Pan-European network for market-oriented, industrial R&D
NEA / AEN	Nuclear Energy Agency of the OECD
IEA / AIE	International Energy Agency
ITER	Internat. Thermonuclear Experimental Reactor
JET	Joint European Torus
EESD	Energy, Environment and Sustainable Development (5 th European FP)
OECD / OCDE	Organisation for Economic Co-operation and Development / Organisation de coopération et de développement économiques
SES	Sustainable Energy Systems (6 th European FP)

ORGANISATION DER FORSCHUNG / ORGANISATION DE LA RECHERCHE

	Bereiche / Domaines	BFE-Bereichsleiter / Responsables de domaine à l'OFEN	Programmleiter / Chefs de programme F,E&D / RD&D
I. Effiziente Energienutzung / Utilisation efficace de l'énergie	Gebäude (Gebäudesystem/-hülle, Haus-technik, Solararchitektur) / Bâtiments (système et enveloppe du bâtiment, installations CVC du bâtiment, architecture solaire)	Andreas Eckmanns	Charles Filleux
	Verkehr (inkl. Leichtmobile) / Transports (y compris les véhicules légers)	Martin Pulfer	Martin Pulfer
	Batterien, Supercaps / Accumulateurs, supercondensateurs		
	Elektrizitätstechnologien und -anwendungen / Technologies et utilisations de l'électricité	Felix Frey	Roland Brüniger
	Netze / Réseaux	Rainer Bacher	Thilo Krause
	Wärme-Kraft-Kopplung / Couplage chaleur-force	Fabrice Rognon	Thomas Kopp
	Verbrennung / Combustion		Stephan Renz
	Kraftwerk 2020 / Centrales à gaz 2020		Peter Jansohn
	Brennstoffzellen / Piles à combustible	Andreas Gut	Andreas Luzzi
	Verfahrenstechnische Prozesse / Technologie des procédés	Martin Stettler	Martin Stettler
II. Erneuerbare Energien / Sources d'énergie renouvelables	Solarwärme (inkl. Speicherung) / Chaleur solaire (y compris stockage)	Urs Wolfer	Jean-Christophe Hadorn
	Photovoltaik / Photovoltaïque		Stefan Nowak
	Industrielle Solarenergienutzung / Utilisation industrielle de l'énergie solaire		Pierre Renaud
	Wasserstoff / Hydrogène	Andreas Gut	Andreas Luzzi
	Umgebungswärme (Wärmepumpen, Kälte) / Chaleur ambiante (pompes à chaleur, froid)	Fabrice Rognon	Thomas Kopp
	Holzenergie / Énergie du bois	Daniel Binggeli	Daniel Binggeli
	Biomasse (ohne Holz) / Biomasse (sans le bois)	Bruno Guggisberg	Bruno Guggisberg
	Kleinwasserkraftwerke / Force hydraulique (petites installations)		Manuel Buser
	Wasserkraft (grosse Werke) & Talsperren / Force hydraulique (grandes installations) & barrages	Georges Darbre	Manuel Buser
	Geothermie / Géothermie	Markus Geissmann	Rudolf Minder
	Windenergie / Énergie éolienne		Robert Horbaty
III. Kernenergie / Énergie nucléaire	Kerntechnik und nukleare Sicherheit / Technique et sécurité nucléaire	Christophe de Reyff ¹⁾	Konstantin Foskolos
	Regulatorische Sicherheitsforschung / Recherche réglementaire en sécurité nucléaire		Thomas Bigler
	Kernfusion / Fusion nucléaire		Andreas Werthmüller
IV. Energiewirtschaftliche Grundlagen / Fondements de l'économie énergétique	Energiepolitik, Ökonomie, Gesellschaft, Umwelt / Politique énergétique, économie, société, environnement	Lukas Gutzwiller	Lukas Gutzwiller
	Technologie-Transfer / Transferts technologiques	Yasmine Calisesi, Andreas Gut, Christophe de Reyff, Gerhard Schriber	

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

Rainer Bacher, Tel. 031 322 56 15
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
Andreas Gut, Tel. 031 322 53 24

Lukas Gutzwiller, Tel. 031 322 56 79
Thilo Krause, Tel. 031 322 56 63
Martin Pulfer, Tel. 031 322 49 06
Christophe de Reyff, Tel. 031 322 56 66
Fabrice Rognon, Tel. 031 322 47 56
Gerhard Schriber, Tel. 031 322 56 58
Martin Stettler, Tel. 031 322 55 53
Urs Wolfer, Tel. 031 322 56 39

Die folgende Adresse ist für alle Obengenannten gültig: **BFE, 3003 Bern**
 Adresses communes à tous les responsables : **OFEN, 3003 Berne**
 Fax : 031 / 323 25 00 E-mail : **Vorname.Name@bfe.admin.ch / prénom.nom@bfe.admin.ch**

ADRESSEN DER PROGRAMMLEITER AUSSERHALB DES BFE / ADRESSES DES CHEFS DE PROGRAMMES À L'EXTÉRIEUR DE L'OFEN

Thomas Bigler
 HSK, 5232 Villigen – HSK
 Tel. 056 310 39 16 – Fax : 056 310 39 95
 E-mail : thomas.bigler@hsk.ch

Roland Brüniger
 R. Brüniger AG, Zwillikerstr. 8, 8913 Ottenbach
 Tel. 01 760 00 66 – Fax : 01 760 00 68
 E-mail : roland.brueniger@r-brueniger-ag.ch

Manuel Buser
 entec ag, Consulting & Engineering
 Bahnhofstr. 4, 9000 St.Gallen
 Tel. 071 228 10 20 – Fax : 071 228 10 30
 E-mail : pl@smallhydro.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

Konstantin Foskolos
 PSI, 5232 Villigen – PSI
 Tel. 056 310 26 92 – Fax : 056 310 44 11
 E-mail : konstantin.foskolos@psi.ch

Jean-Christophe Hadorn
 Base Consultants SA
 51, ch. du Devin, 1012 Lausanne
 Tel. 021 651 42 82 – Fax : 021 651 42 83
 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

Thomas Kopp
 FH Ostschweiz, Oberseestr. 10, 8640 Rapperswil
 Tel. 055 222 49 23 – Fax : 055 222 44 00
 E-mail : thomas.kopp@hsr.ch

Andreas Luzzi
 FH Rapperswil, Oberseestr. 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 62
 E-mail : rudolf.minder@bluewin.ch

Stefan Nowak
 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