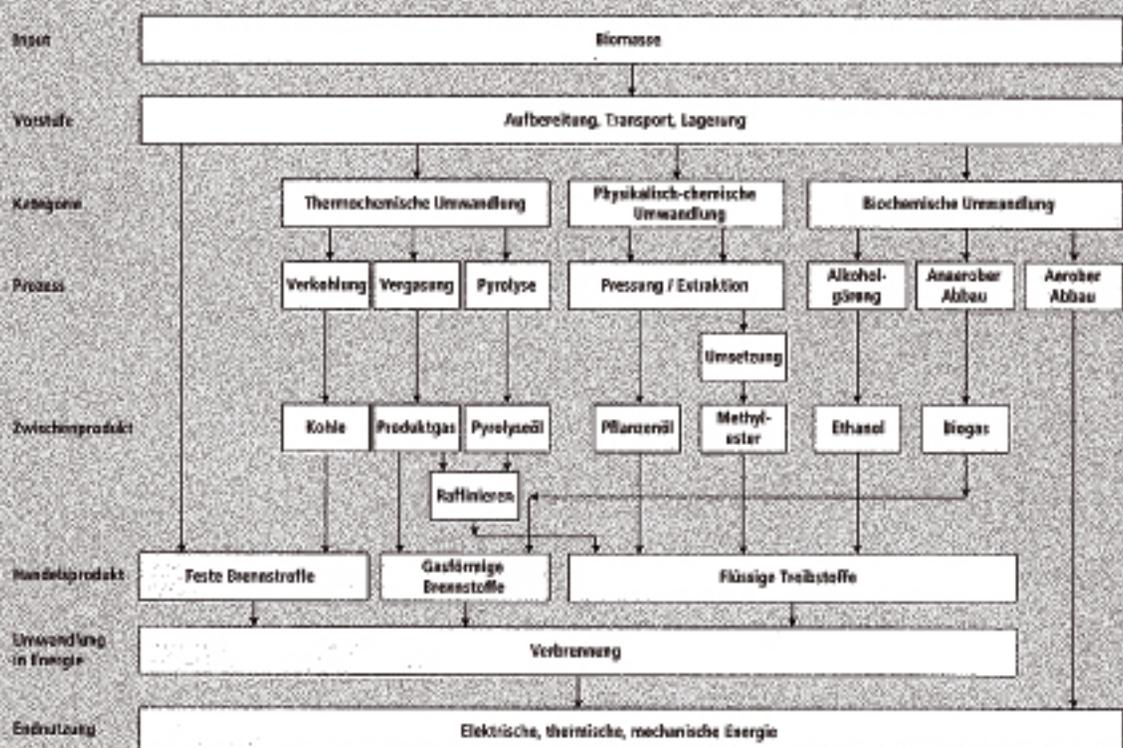


Recherche énergétique Energie-Forschung 2004

Rapports de synthèse des chefs de programme
Überblicksberichte der Programmleiter

Forschungs-Schwerpunkt:
Biomasse-Umwandlung



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

Andreas Gut, BFE, 3003 Bern
Tel. 031 322 53 24 Fax 031 323 25 00

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

Christophe de Reyff, OFEN, 3003 Berne
tél. 031 322 56 66 fax 031 323 25 00

Bezugsort für Berichte / Centre de distribution pour les rapports:

BFE, Sektion Kommunikation, 3003 Bern, www.energieforschung.ch

OFEN, Section Communication, 3003 Berne, www.recherche-energetique.ch

31.05.2005

Vorwort / Avant-propos		3
Fortschritte der Energieforschung 2004 / Survol de la recherche énergétique en 2004		4
Überblicksberichte der Programmleiter / Rapports de synthèse des chefs de programme		
RATIONELLE ENERGIE- NUTZUNG / UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE	Rationelle Energienutzung in Gebäuden Verkehr und Akkumulatoren Elektrizität Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte Feuerung und Verbrennung Brennstoffzellen Verfahrenstechnische Prozesse	9 21 33 45 61 73 85
ERNEUERBARE ENERGIEEN / SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLES	Solaire actif : chaleur et stockage de chaleur Photovoltaik Solarchemie / Wasserstoff Biomasse Kleinwasserkraftwerke Geothermie Windenergie	89 103 123 131 145 153 165
KERNENERGIE / ÉNERGIE NUCLÉAIRE	Nukleare Sicherheit und Entsorgung Regulatorische Sicherheitsforschung Fusion thermonucléaire contrôlée	175 187 199
ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN / FONDEMENTS DE L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE	Energiewirtschaftliche Grundlagen	205
Anhänge / Annexes		
Abkürzungen / Sigles		215
Energieforschungsorganisation (F+E & P+D) / Organisation de la recherche énergétique (R+D & P+D)		216
Wichtige Adressen / Adresses importantes		217

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 2002/2003* gibt Auskunft über die Aufwendungen der mit öffentlichen Mitteln finanzierten Energieforschung sowie eine detaillierte Zusammenstellung der Geldflüsse. Daraus geht hervor, dass die öffentliche Hand 2003 für die Energieforschung 184 Mio. CHF aufgewendet hat, wovon ca. 29 Mio. CHF für P+D-Projekte. Die entsprechenden Aufwendungen des BFE betragen 36 bzw. 13 Mio. CHF. Die Zahlen für 2004 liegen noch nicht vor; infolge Sparmassnahmen dürften sie im P+D-Bereich etwas geringer ausfallen.

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 des BFE (www.energie-schweiz.ch) unter der Rubrik *Forschung* 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 (www.energieforschung.ch). Das Reproduzieren von einzelnen Beiträgen ist – unter Angabe der Quelle – gestattet.

Mai 2005

BUNDESAMT FÜR ENERGIE

Titelbild:

Übersicht über die Prozesse und Technologien zur Nutzung von Biomasse (Quelle: Kaltschmitt M., 2003, adaptiert)

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 responsables 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 2002/2003* donne des renseignements sur les dépenses consenties par les pouvoirs publics pour la recherche énergétique ainsi qu'une revue détaillée des montants provenant des diverses sources de financement. En bref, l'ensemble des pouvoirs publics ont soutenu la RD&D à hauteur de 184 MCHF en 2003, dont quelque 29 MCHF ont été consacrés aux projets P+D. Les dépenses de l'OFEN se montaient à 36 MCHF dont 13 MCHF pour les projets P+D. Les chiffres pour 2004 ne sont pas encore connus ; du fait des mesures d'économie ils devraient être moindres dans le secteur des 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 en 2004 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 – tout comme d'autres publications – sur le site de l'OFEN, (www.suisse-energie.ch) sous la rubrique *Recherche*. La plupart des rapports annuels (RA) des projets individuels, cités dans les rapports de synthèse, sont aussi téléchargeables. Les rapports finals (RF) des projets se trouvent sur le site Internet : www.recherche-energetique.ch. La reproduction d'extraits du présent document est autorisée – à condition d'en indiquer la source.

Mai 2005

OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉNERGIE

Page de titre :

Vue d'ensemble des procédés et des technologies pour l'utilisation de la biomasse (source : adaptation de Kaltschmitt M., 2003)

FORTSCHRITTE DER ENERGIEFORSCHUNG 2004

SURVOL DE LA RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE EN 2004

Gerhard Schriber – Andreas Gut – Christophe de Reyff
Forschungskoordination BFE / Coordination de la recherche OFEN

Auch die Energieforschung macht nur selten grosse Sprünge, aber stetig Fortschritte. Um Erfolge zu erreichen, gilt es deshalb beharrlich auf die angestrebten Ziele hin zu arbeiten. Infolge der langen Lebenszyklen der energierelevanten Technologien sind zudem relativ lange Zeithorizonte in Betracht zu ziehen. Die Sicherstellung der Kontinuität ist deshalb bedeutend für eine erfolgreiche Forschungsarbeit im Energiebereich und eine wichtige Aufgabe der BFE-Forschungsbegleitung. Koordination der Arbeiten im nationalen und internationalen Umfeld sowie der Brückenschlag zwischen den öffentlichen Forschungsstätten und der Privatwirtschaft sind weitere Voraussetzungen für erfolgreiche Forschung. Auch dies sind Aufgaben im Pflichtenheft der BFE-Programmlieferanten. Wie aus den vorliegenden Jahresüberblicken hervorgeht, erfüllen sie ihre Aufgaben vollumfänglich. Es darf zudem festgestellt werden, dass die gesteckten Jahresziele fast durchwegs erreicht worden sind, was von einem beachtlichen Engagement der Schweizer *Energieforscher* zeugt.

Die folgende Auswahl einiger Projekt-Ergebnisse soll einerseits die Breite der geförderten Forschung aufzeigen, andererseits aber auch die hohen Kompetenzen der involvierten Forschungsstellen. Sie erbringen die notwendigen Fortschritte auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung bei gleichzeitiger Stärkung unserer wirtschaftlichen Stellung.

Es sei darauf hingewiesen, dass über die Energieforschung der öffentlichen Hand auch an mehreren anderen Stellen berichtet wird. Erwähnenswert sind der Jahresbericht der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE, welcher die Arbeiten in einen weiteren Kontext stellt, sowie die ausführlichen Übersichten der Forschungsstellen des ETH-Bereichs.

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG

Die Wärmelasten transparenter Bauteile und Sonnenschutzsysteme wurden an typischen Fasadensystemen am Solarprüfstand der EMPA gemessen, und deren Charakteristik wurde im Rahmen eines IEA-Projekts modelliert. Die verbesserten Beschattungsmodelle wurden in die Gebäudesimulationsprogramme integriert, sodass nun die sommerliche Solareinstrahlung in Gebäude besser berechnet werden kann. Ein Teil der umfangreichen Forschungsarbeiten in der **Gebäudetechnik** fliesst zudem regelmässig ein in Arbeitsunterlagen für Bauherren und Generalplaner von grösseren Bauten (www.bestellerkompetenz.ch).

Im **Fahrzeug-Leichtbau** entwickeln die Fachhochschulen Aargau und beider Basel zusammen mit vier Zulieferbetrieben für die Automobilindustrie eine

La recherche énergétique, elle aussi, ne fait que rarement de grands sauts, mais progresse de façon continue. Pour accéder au succès, il importe de s'en tenir strictement aux buts fixés. À cause des longs cycles de vie des technologies énergétiques, les horizons temporels sont relativement lointains. Une continuité doit être assurée pour un travail de recherche fructueux dans le domaine énergétique et c'est là une tâche importante de l'accompagnement de la recherche par l'OFEN. La coordination des travaux au plan tant national qu'international, ainsi que l'établissement de forts liens entre les institutions publiques de recherche et l'économie privée sont autant d'exigences pour assurer le succès d'une recherche. Ces tâches font aussi partie du cahier des charges des chefs de programme de l'OFEN. Comme on pourra s'en rendre compte en lisant les rapports de synthèse de ce document, ils remplissent leurs tâches avec succès. Il faut souligner en outre que les buts fixés pour l'année ont, dans leur grande majorité, été atteints ; ce qui dénote un engagement certain des «chercheurs énergétiques» suisses.

Le choix ci-dessous de quelques résultats de projets illustre l'important éventail de la recherche soutenue par les pouvoirs publics, mais aussi le niveau élevé de compétences des institutions de recherche engagées. Celles-ci contribuent au progrès nécessaire dans la quête de solutions pour un approvisionnement énergétique durable tout en renforçant notre place économique.

Bien d'autres organisations publient des rapports se rapportant à la recherche énergétique soutenue par les pouvoirs publics. Mentionnons les rapports annuels de la CORE, qui présentent les travaux dans un autre contexte, et ceux des diverses institutions de recherche du Domaine des EPF.

UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE

Les charges de chaleur des éléments de construction transparents et des systèmes pare-soleil ont été mesurées au LFEM/EMPA sur des systèmes de façade typiques ; leur caractéristique a été modélisée dans le cadre d'un projet de l'AIE. Les modèles améliorés d'ombrage ont été intégrés dans les programmes de simulation des bâtiments de façon que l'irradiation estivale puisse être mieux calculée. Une partie des nombreux travaux de recherche dans le domaine des **techniques du bâtiment** est régulièrement introduite dans des documents de travail pour les maîtres d'œuvre et les concepteurs de constructions d'importance (www.bestellerkompetenz.ch).

Dans le domaine de la **construction de véhicules légers**, les HES d'Argovie et des deux Bâle ont collaboré

fahrbare Plattform zur Erprobung von funktionalen Leichtbau-Modulen (Front, Boden, Dach, Kofferraum, etc.). Die fahrbare Plattform erlaubt eine Marken-neutrale Demonstration der Module bei den Automobil-Herstellern.

Druckluftsysteme sind im Elektrizitätsbereich sowohl bei der Speicherung als auch beim Verbrauch von Bedeutung. Es konnte beispielsweise gezeigt werden, dass praktisch isotherme Druckluftspeicher-Konzepte neue Speichermöglichkeiten bieten und dass knapp die Hälfte der 750 GWh, welche heute schweizweit in ca. 150'000 Druckluftanlagen verbraucht werden, durch Optimierungen eingespart werden könnten. Es ist nun geplant, ein **Druckluft-Kompetenzzentrum** an der Fachhochschule Luzern einzurichten.

Für den Heizungssanierungsmarkt werden Wärmepumpen mit Temperaturhub bis 65 °C benötigt. Seit November 2004 ist die **Wärmepumpe Swisstop**, welche aus dem vom BFE initiierten Forschungs-Wettbewerb *Swiss Retrofit Heat Pump* entstanden ist, im Handel erhältlich. Drei Gerätetypen von *Swisstop* im Leistungsbereich von 10 bis 20 kW werden angeboten. Sie erreichen Gütegrade von etwa 45%.

Neben den CO₂-Emissionen sind bei der **motorischen Verbrennung** Russ und NO_x unerwünschte Emissionen. Innermotorische Massnahmen sind die bevorzugte Lösung bei deren Senkung, da mit Filtern die Motorenleistung abnimmt und Katalysatoren oft Edelmetalle benötigen. Das durch langjährige Forschung erworbene Know-How des PSI und der ETHZ bei innermotorischen Prozessen aus der Hochdruck-Hochtemperatur-Zelle fliesst seit Mitte 2004 in ein EU-Projekt ein und kommt am Prüfstand eines Motorenherstellers, zur Untersuchung der Verbrennung in Schiffsdieselmotoren, zum Einsatz.

Das PSI hat zusammen mit *Michelin* das von Grund auf neu konzipierte und auf **Brennstoffzellen-Betrieb optimierte Fahrzeug HY-LIGHT** entwickelt, welches weltweit Beachtung findet. Das Fahrzeug weist folgende Kenndaten auf: Gewicht: 850 kg, Reichweite: 400 km (bei 80 km/h), Verbrauch: weniger als 25 kWh H₂ pro 100 km (entspricht weniger als 2,5 Liter Benzin-äquivalent pro 100 km). Der Wasserstoffspeicher ist in die Fahrzeugstruktur integriert.

ERNEUERBARE ENERGIEN

Bei der Nutzung von **Umgebungswärme** mittels Wärmepumpen stellen die klassischen FCKW als Arbeitsmittel im Fall eines Lecks immer noch eine Gefährdung der Umwelt dar. Versuche mit den natürlichen Arbeitsmitteln Propan (C₃H₈), Kohlendioxid (CO₂) oder Ammoniak (NH₃) sind im Gange, wobei CO₂ die besten Resultate erzielte. Dessen Einsatz in seiner superkritischen Form benötigt dagegen einen sehr hohen Druck, der bis 11 MPa (~110 bar) gehen kann. Im Rahmen eines P+D-Projekts wurde eine Wärmepumpe mit CO₂ als Arbeitsmittel entwickelt, welche für die Raumheizung und die Warmwasserproduktion bis 80 °C eingesetzt wird. Die 60 kW Anlage befindet sich im Spital von Le Locle.

avec quatre entreprises de fournisseurs pour l'industrie automobile dans le développement d'un châssis capable de rouler en vue de tester des modules de construction légère fonctionnels (avant, plancher, toit, coffre, etc.) Ce châssis mobile permet une démonstration neutre des divers modules auprès des fabricants d'automobiles.

Dans le domaine de l'électricité, il ne faut pas négliger les systèmes à air comprimé, aussi bien en ce qui concerne son stockage que son emploi. On a pu montrer que des concepts de réservoirs d'air comprimé pratiquement isothermes offrent de nouvelles possibilités de stockage et que près de la moitié des 750 GWh actuellement consommés par quelque 150'000 compresseurs en Suisse pourrait être économisée grâce à diverses optimisations. Il est prévu d'établir un **Centre de compétence de l'air comprimé** à la HES de Lucerne.

Dans le domaine du marché de la rénovation de chauffage, on a besoin de pompes à chaleur avec un saut de température de 65 °C. La pompe à chaleur **Swisstop**, qui a été créée grâce au concours de recherche *Swiss Retrofit Heat Pump* lancé par l'OFEN, est maintenant sur le marché depuis novembre 2004. Trois types d'appareils sont proposées par *Swisstop* dans la gamme de puissance de 10 à 20 kW. Elles atteignent un degré de qualité de 45%.

À côté des émissions de CO₂, celles de suie et de NO_x sont indésirables lors de la **carburation par un moteur**. Des mesures mises en œuvre au sein même du moteur constituent la solution préférée pour abaisser ces émissions, car des filtres diminuent la puissance des moteurs et les catalyseurs nécessitent souvent des métaux précieux. Le savoir-faire combiné du PSI et de l'EPF de Zurich en matière de processus internes aux moteurs, acquis grâce à de longues années de recherche sur la cellule à haute pression et à haute température, a été mis à disposition d'un projet de l'UE depuis la mi-2004 et est sollicité dans le banc d'essai d'un fabricant de moteurs en vue de l'examen de la carburation de moteurs de bateau.

En collaboration avec *Michelin*, le PSI a développé de toutes pièces le véhicule optimisé **HY-LIGHT, basé sur des piles à combustible** qui a retenu mondialement l'attention. Ses données sont les suivantes : poids, 850 kg ; portée, 400 km (à 80 km/h) ; consommation, moins de 25 kWh d'hydrogène (H₂) pour 100 km (ce qui correspond à moins de 2,5 litres d'essence). Le réservoir d'hydrogène est intégré à la structure du véhicule.

SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLES

Dans le domaine de la **chaleur tirée de l'environnement** et de son utilisation grâce aux pompes à chaleur (PAC), les fréons classiques représentent toujours un danger pour l'environnement en cas de fuite. On essaie maintenant des agents «naturels», soit le propane (C₃H₈), le dioxyde de carbone (CO₂) ou l'ammoniac (NH₃). Le choix du CO₂, dans son état surcritique, est des plus prometteurs, mais son emploi nécessite de travailler à des pressions allant jusqu'à 11 MPa (~110 bars).

Für die Nutzung der **Sonnenergie** sind Projekte im Gang, welche für die zeitliche Phasenverschiebung zwischen Wärmeproduktion und -nutzung im Bereich Tag/Nacht und Sommer/Winter optimale **Speicher-Lösungen** bezüglich Dimensionierung und Verdichtung entwickeln. Das Prinzip eines Tagesspeichers, welcher auf einer thermisch diffusiven Phasenverschiebung basiert, wurde an der Universität Genf entwickelt. Dabei wird tagsüber Wärme akkumuliert und nachts mit einer vorhersagbaren Zeitverschiebung wieder abgegeben. Das Prinzip kann auch für die Kühlung verwendet werden. Die P+D-Anlage der SUVA in Root besteht aus einem solaren Speicher und einer Wärmepumpe, womit 50% der benötigten Wärme erneuerbar produziert werden kann.

Die **Photovoltaik-Forschung** ist einer der Schwerpunkte des Institut de Microtechnique der Universität Neuenburg. Im Herbst hat ein wichtiger Wechsel stattgefunden, indem Prof. Christoph Ballif die Nachfolge von Prof. Arvind Shah angetreten hat, welcher das Institut während mehr als 20 Jahre leitete. Während dieser Zeit gelang der Gruppe von Prof. Shah die Entwicklung einer mikromorphen Tandemzelle auf Glasträger, welche einen initialen Wirkungsgrad von 9.2% aufweist. Durch die Zusammenarbeit mit der EPF Lausanne und *Unaxis* wird gegenwärtig ein industrieller Prozess entwickelt, der die Herstellung von bis zu 1.4 m² grossen Zellen in einem Plasma-Reaktor ermöglichen soll.

Für die **Windenergie** wurde ein nationales Konzept ausgearbeitet, in welchem als Ziele für die jährliche Energieproduktion im Jahr 2010, 100 GWh und im Jahr 2050, 4 TWh anvisiert werden (heute 6 GWh). Gegenwärtig befasst sich die Forschung in diesem Bereich mit der Entwicklung von intelligenten Rotorblättern, mit welchen dank einer neuartigen Konstruktion das Gewicht im Vergleich zu herkömmlichen Rotorblättern halbiert, die Belastung reduziert und dank verstellbarem dem Wind automatisch angepasstem Profil (*pitch* und *twist* Verstellung) die Effizienz erhöht werden kann. Die Schweiz nimmt ausserdem am Windenergieprogramm der IEA teil und arbeitet auf dem Gebiet der Windenergie in kaltem Klima mit ausländischen Forschergruppen zusammen.

Auf dem Gebiet der **Kleinwasserkraft** läuft ein EU-Projekt mit dem Titel *Spatial Plans and Local Arrangements for Small Hydro*, in welchem Werkzeuge zur Identifizierung potentieller, noch nicht erschlossener Standorte für Kleinwasserkraftwerke entwickelt werden. Zudem wurde ein europäisches Netzwerk gegründet, in welchem die EPF Lausanne und MHyLab in Montcherand die Schweiz vertreten.

In der tiefen **Geothermie** beschäftigt sich die Forschung mit der Abstimmung zwischen der Wärmegewinnung mittels *Hot-Dry-Rock/Hot-Wet-Rock* und der Umwandlung der Wärme zu Elektrizität. Dieses Thema wird auch im Rahmen des EU-Projekts *Enhanced Geothermal Systems* untersucht. In einem kartografischen Inventar des Schweizer Mittellandes wurde pro km² und für 5 km Tiefe ein Potential von

Un projet pilote de PAC au CO₂, pour produire à la fois de l'eau chaude domestique jusqu'à 80 °C et de la chaleur pour le chauffage, a été développé. Une telle installation expérimentale de 60 kW équipe déjà l'hôpital du Locle.

Pour l'utilisation de l'**énergie solaire** la question du déphasage temporel de quelques heures entre sa production et son utilisation, ainsi que celle de son **stockage** saisonnier à long terme font l'objet de travaux pour en assurer l'optimisation, le dimensionnement et la densification. Un «déphaseur thermique diffusif», mis au point par l'Université de Genève, permet d'accumuler de la chaleur – ou au contraire du froid durant la nuit – et de la restituer avec un déphasage temporel prévisible de quelques heures. Le projet pilote de la SUVA, à Root (LU), de son côté, combine un stock de chaleur, chargé par l'énergie solaire, et une PAC. L'ensemble des diverses utilisations de chaleur est ainsi couvert à raison de 50% par de l'énergie renouvelable.

L'énergie solaire **photovoltaïque (PV)** est au cœur des recherches menées à l'Institut de Microtechnique de l'Université (IMT) de Neuchâtel. En automne 2004 s'est achevée à l'IMT une importante phase des travaux sur le développement des cellules PV en couches minces de silicium : le professeur Christophe Ballif a pris la succession du professeur Arvind Shah, actif dans ce domaine durant plus de 20 ans. Les travaux menés par son équipe à l'Université de Neuchâtel dans le domaine photovoltaïque ont permis de mettre au point une cellule PV tandem micromorphe sur du verre avec un rendement initial de 9,2%. Les perspectives sont de pouvoir produire des surfaces allant jusqu'à 1,4 m² en un procédé industriellement transposable. Pour ce faire, un réacteur de taille suffisante est en voie de développement grâce à une collaboration entre la firme Unaxis et l'EPF de Lausanne.

Pour l'énergie **éolienne** (quelque 6 GWh aujourd'hui) un plan directeur national a été élaboré visant à atteindre une production d'électricité de 100 GWh en 2010 et de 4'000 GWh en 2050. Aujourd'hui la recherche est en train de développer de nouvelles pales de rotor, dites intelligentes, grâce à toute une série de détails de construction qui, à la fois, diminuent le poids des rotors de moitié et augmentent leur résistance à la fatigue, ainsi que leur efficacité, par une adaptabilité instantanée du profil (*pitch & twist*) des pales aux conditions changeantes du vent. La Suisse participe au programme «Énergie éolienne» de l'AIE et y contribue dans le domaine de l'utilisation des éoliennes dans des conditions climatiques alpines rigoureuses

Dans le domaine de l'**énergie hydraulique** une collaboration internationale, sous forme du projet *Spatial Plans and Local Arrangements for Small Hydro* dans le cadre d'un programme de l'UE va permettre d'élaborer des outils pour l'identification de sites potentiels jusque là négligés pour des centrales hydroélectriques de petites tailles. Un réseau européen a été mis sur pied qui regroupe, pour la Suisse, l'EPF de Lausanne et le Laboratoire MHyLab de Montcherand.

270 bis 400 PJ Wärme abgeschätzt, wovon lediglich 10 bis 70 PJ nutzbar sind wegen Limitierungen durch unterschiedliche hydraulische Charakteristiken des Gesteins.

Bei der energetischen Nutzung von **Biomasse** existiert ein Potential von 123 PJ wovon heute 37 PJ genutzt werden. Dies entspricht bereits 4% der Endenergienutzung in der Schweiz. Unter den für die Forschung vorrangig zu lösenden Problemen ist die Senkung der Partikelemissionen aus der Verbrennung. In einem Projekt wird die Partikelbildung aus Holzfeuerungen untersucht, auch im Hinblick auf die Erarbeitung eines Konzepts einer *Low-Particle*-Pellet-Feuerung mit einer Reduktion des Partikel-Ausstosses von 50 bis 80% für Anlagen mit einer Heizleistung von 100 bis 500 kW. Es wurde bereits eine Senkung des Partikelgehalts im Abgas auf 50 mg/m³ erreicht.

KERNENERGIE

Ein Problemkreis der **regulatorischen Sicherheitsforschung der Kernenergie** ist die Lagerung radioaktiver Abfälle im Wirtgestein. In Zusammenarbeit mit 12 Partnern aus 6 Länder werden im Felslabor *Mont Terri* alle geologischen, hydraulischen, hydrochemischen und mechanischen Aspekte des Opalinuston untersucht. Geologen der ETH Zürich haben mittels numerischer Simulation die Kluftbildungen, die beim Ausbruch eines Stollens entstehen, modelliert. Klufnetzwerke führen zu präferentiellen Ausbreitungspfaden eventueller Ausflüsse und beeinflussen damit die Sicherheit des Endlagers.

Die Abteilung **Nukleare Energie und Sicherheit** des PSI untersucht – zusammen mit Partnern aus EU-Ländern – langfristige Mechanismen von Werkstoffschädigungen in Kernkraftwerken, insbesondere im Zusammenhang mit der Verlängerung der Nutzungsdauer. Speziell untersucht wird der Einfluss von starken, zyklischen Wärmebelastungen, bei denen sich rostfreier Stahl teilweise von Austenit zu Martensit umwandelt, je nach metallurgischer Vorgeschichte zwischen 1,5 und 55,5%. Der Vorgang erweist sich komplexer als gedacht, da verschiedene Modifikationen mit Mikrophasen von einigen 10 Mikrometern bestehen. Die entstehenden Nukleationsprozesse können zu sich ausbreitenden Defekten und schliesslich zu Rissen führen.

Im Bereich der **Kernfusion** verfügt die ETH Lausanne über den weltweit einzigen Tokamak, mit welchem Plasmas in verschiedenen Formen erzeugt werden können. Dies ist unabdingbar, will man Simulationsrechnungen verifizieren und eine optimale Geometrie des Herzens zukünftiger Kraftwerke bestimmen. 2004 sind weitere Modalitäten der Heizung mittels Zyklotronelektronenwellen, Wandeffekte, verschiedene Verhaltensstörungen des Plasmas sowie weitere Erfordernisse des magnetischen Plasma-Einschlusses charakterisiert worden. Spezielle Fortschritte sind zu verzeichnen bei der wirksamen Energie-Absorption der 3. harmonischen Zyklotronelektronenwelle durch das Plasma.

En **géothermie**, pour l'extraction de chaleur profonde par le processus dit *Hot-Dry-Rock/Hot-Wet-Rock Technology* l'ensemble «extraction de chaleur/ transformation d'énergie» doit être soigneusement harmonisé. Ce problème fait l'objet de travaux sous le titre *Enhanced Geothermal Systems*, dans un projet de l'UE. À cet effet, un inventaire cartographique de la Suisse montre que, par km² et pour 5 km de profondeur, se trouve un potentiel de quelque 270 à 440 PJ de chaleur, dont seulement 10 à 70 PJ pourront être utilisables en raison des caractéristiques hydrauliques variables des roches.

En **biomasse**, le potentiel énergétique se monte en Suisse à quelque 123 PJ dont, à ce jour, on n'exploite que le tiers, soit 37 PJ. Cela représente déjà 4% de la consommation finale d'énergie en Suisse. Parmi les nuisances éventuelles se trouve la production de particules très fines (poussières) résultant de la combustion. Un projet de recherche se consacre à l'étude de la formation d'aérosols lors de la combustion de bois ; cela en vue de permettre la mise au point d'un concept de combustion «Low-Particle» de pellets, avec une réduction de 50 à 80% des émissions de poussières, pour des installations de 100 à 500 kW de puissance de chauffage. On est parvenu à abaisser ainsi la teneur en poussières à seulement 50 mg/m³.

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Dans le domaine de la **recherche réglementaire en sécurité nucléaire** l'une des problématiques est le stockage des déchets nucléaires dans des roches hôtes. Le Laboratoire du Mont Terri – en collaboration internationale avec 12 partenaires provenant de 6 pays – permet d'examiner dans le détail tous les aspects géologiques, hydrauliques, hydrochimiques et mécanique de la roche dite Argile à Opalinus. Les géologues de l'EPF de Zurich ont entrepris l'étude et la simulation numérique des formations de fissures et de leur propagation dans une zone fragilisée par la présence de galeries. Ces fractures forment des réseaux qui sont à même de devenir des conduits d'écoulement préférentiels pour d'éventuels effluents et, par là, d'affecter la sécurité d'un dépôt final.

De son côté le Département «**Énergie et sécurité nucléaires**» du PSI, dans un projet réalisé en collaboration avec d'autres pays de l'UE, se penche sur le mécanisme à longue durée des dégâts subis par les matériaux constitutifs des divers composants des centrales nucléaires, et cela en relation avec les diverses actions entreprises pour l'allongement de leur durée d'exploitation. Les composants soumis à des charges thermiques importantes, à un régime cyclique élevé, sont particulièrement étudiés. La transformation partielle dans les aciers inox de l'austénite en martensite – entre 1,5 et 55,5%, selon «l'histoire métallurgique» des divers composants – s'est révélée être plus complexe que prévue, puisque différentes modifications existent avec des microphases de taille de quelques dizaines de micromètres. Des processus de nucléation se développant, ce sont autant de sources de défauts potentiels qui peuvent se propager ensuite en créant des fissures.

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Im Rahmen der BFE-Energieperspektiven wurden verschiedene **Potentialstudien** erarbeitet. Als Beispiel sei die Studie zur energetischen Nutzung von Biomasse erwähnt. Die Resultate zeigen, dass das ökologische Biomassepotenzial langfristig (2040) dem 2,5- bis 3-fachen der heutigen energetischen Nutzung entspricht. Einige der untersuchten Technologien sind schon bei den heutigen Ölpreisen konkurrenzfähig. Unter der Annahme, dass der Ölpreis in 40 Jahren sich mindestens verdoppelt, werden es bis spätestens 2020 auch die übrigen Technologien sein.

En matière de **fusion thermonucléaire contrôlée**, le Tokamak à Configuration Variable de l'EPF de Lausanne 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 pour planifier la géométrie optimale du cœur des futures centrales thermonucléaires. Les travaux réalisés en 2004 ont permis de caractériser plus avant les modalités du chauffage par ondes cyclotron-électroniques, les effets de bords et de diverses perturbations sur le comportement du plasma, ainsi que les exigences posées par le confinement magnétique. Des progrès ont notamment été réalisés dans l'absorption efficace par le plasma de l'énergie apportée par la 3^e harmonique de l'onde cyclotron-électronique.

FONDEMENTS DE L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE

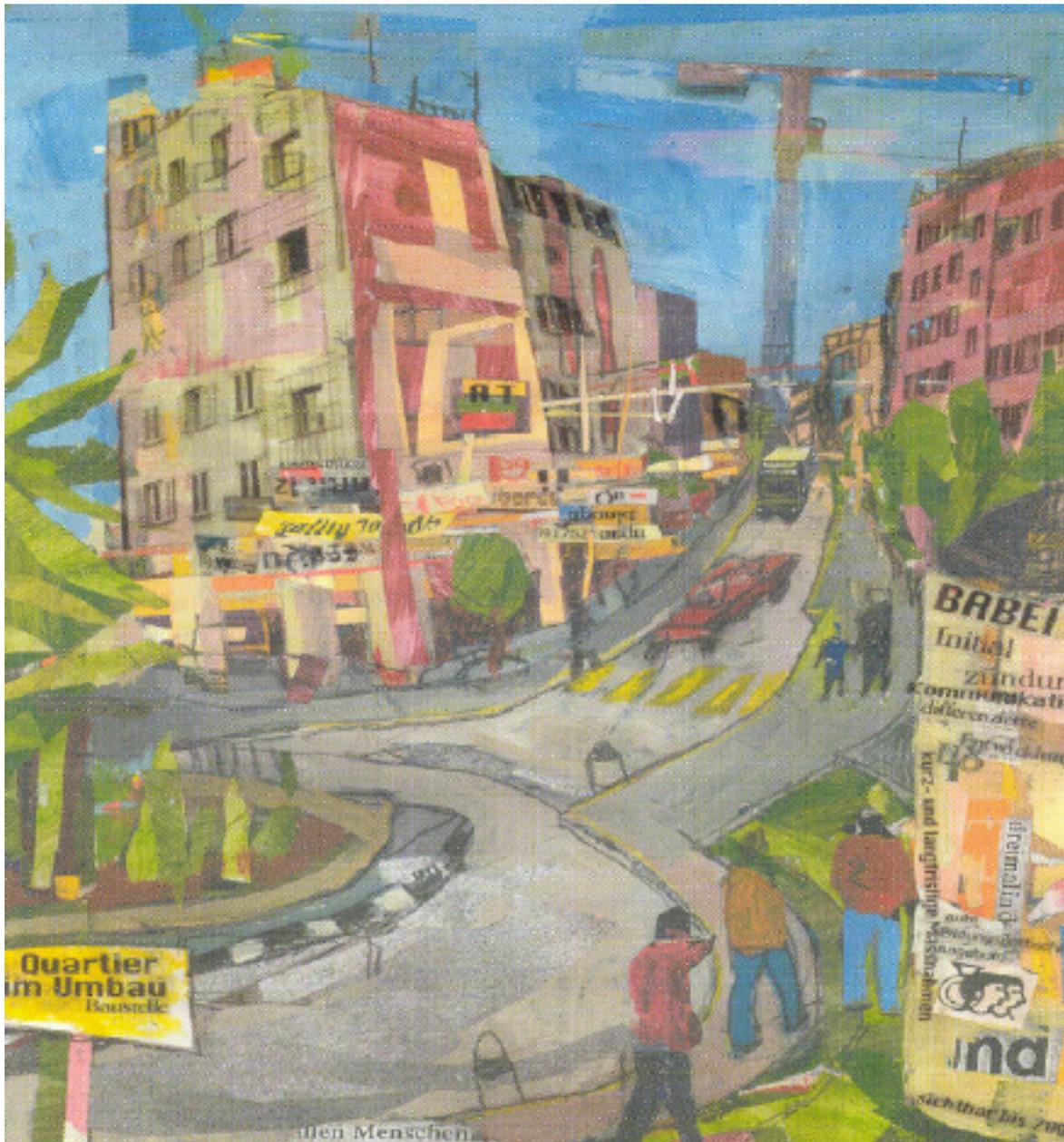
Dans le cadre des perspectives énergétiques de l'OFEN ont été élaborées plusieurs **études de potentiel**. Citons, comme exemple, celle sur une utilisation énergétique de la biomasse. Les résultats montrent qu'à longue échéance (2040) son potentiel écologique est 2,5 à 3 fois plus élevé que l'usage qui en est fait actuellement. Certaines des technologies examinées sont déjà concurrentielles, vu le prix actuel du pétrole. Sous l'hypothèse que ce prix va au moins doubler d'ici 40 ans, les autres technologies vont aussi atteindre la rentabilité au plus tard en 2020.

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG IN GEBÄUDEN

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Mark Zimmermann

mark.zimmermann@empa.ch



Nachhaltige Quartierentwicklung

Nachhaltiges Bauen ist mehr als energieeffizientes Bauen. Im Projekt *Nachhaltige Quartierentwicklung* entwickeln drei Bundesämter zusammen mit *Novatlantis* in Basel, Lausanne, Luzern und Zürich Konzepte, wie sich die Strategie Nachhaltigkeit gesamtheitlich umsetzen lässt.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Forschungsprogramm *Rationelle Energienutzung in Gebäuden* fördert den effizienten und umweltschonenden Energieeinsatz im Gebäudebereich, indem es Grundlagen erforscht und die Entwicklungen innovativer Technologien unterstützt. Dabei werden primär Technologien gefördert, die längerfristig Einsparpotentiale gegenüber konventionellen Gebäuden von 50 – 90% ermöglichen könnten.

Heute wird knapp 50% des schweizerischen Primärenergieverbrauchs für Gebäude aufgewendet: 30% für Heizung, Klimatisierung und Warmwasser, 14 % für Elektrizität und etwa 6 % für die Herstellung und den Unterhalt. Die Ausnutzung der nach wie vor grossen Sparpotentiale im Gebäudebereich ist volkswirtschaftlich von grossem Interesse. Der Gebäudebereich ist auch massgeblich verantwortlich für den Verbrauch stofflicher Ressourcen, das Abfallaufkommen und die Umweltbelastung unserer Gesellschaft.

Für das Programm stehen die **Optimierung ganzer Gebäudesysteme** und die **ganzheitliche Berücksichtigung der Umweltwirkungen** im Vordergrund. Es befasst sich im Speziellen mit der **Gebäudehülle**, mit den **haustechnischen Installationen** und mit **der Nutzung der Sonnenenergie**. In den letzten zwei Jahren wurden vermehrt auch übergeordnete städtebauliche Aspekte einbezogen.

Die aktuellen Programmschwerpunkte sind mit dem Konzept der Energieforschung des Bundes 2004-2007 abgestimmt. Im Wesentlichen sind dies:

- **Hochisolationstechnik:** Entwicklung neuer, hochisolierender Dämmstoffe und Systeme,

als platzsparende Alternative zu voluminösen, konventionellen Dämmsystemen. Platzsparende Systeme sind insbesondere für Gebäudesanierungen interessant.

- **Elektrizitätsnutzung und dezentrale Elektrizitätserzeugung in Gebäuden:** Gebäudeintegration von Systemen zur kombinierten Wärme- und Strombereitstellung sowie Ausschöpfen von Stromsparpotentialen im Gebäude.
- **Gebäudekühlung:** Vermeiden von Kühllast und Bereitstellen von innovativen Technologien zur Sicherstellung des sommerlichen Komforts.
- **Umweltaspekte energieeffizienter Bauten:** Bereitstellen von Grundlagen und Hilfsmitteln zur umweltbezogenen Beurteilung von Energiestandards, neuen Energiesystemen und Baukonstruktionen.
- **Nachhaltige Quartierentwicklung:** Einbezug städtebaulicher Aspekte im Sinne einer ganzheitlichen, über das einzelne Gebäude hinausgehenden Entwicklung des umbauten Raums.

Auf diesen Gebieten will das Programm massgebende Impulse setzen und die Entwicklung mitbestimmen. Zusammen mit ergänzenden Technologien sollen damit die Voraussetzungen geschaffen werden, dass die Bauwirtschaft mittelfristig in der Lage sein wird, entscheidend zu einer **nachhaltigen Gesellschaft** und zu den Zielen der Klimakonvention beitragen zu können.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

UMWELT / NACHHALTIGKEIT

Die rationelle Energienutzung ist letztlich eine Strategie zur Reduktion von Umweltbelastungen, insbesondere zur Reduktion der Treibhausgase. Bauprozesse und der Betrieb von Gebäuden sind bedeutende Verursacher von Treibhausgasen und Umweltschadstoffen. Das Programm kooperiert deshalb intensiv mit anderen Bundesämtern und Forschungsprogrammen, um die Umweltwirkun-

gen der Energienutzung und der Bauprozesse zu minimieren.

Die Herausgabe der Ökoinventar-Datenbank **Eco-invent** im September 2003 stellte einen wichtigen Meilenstein dar. Diese umfassende und harmonisierte Datenbank von Ökoinventaren für Energiesysteme, Investitions- und Konsumgüter, Transporte und Entsorgungsprozesse wurde nochmals ergänzt, dokumentiert und einer neuen Trä-

gerschaft übergeben, welche nun die Arbeiten selbstständig weiterführt (www.ecoinvent.ch). Anfangs 2005 werden die wichtigsten Ökoinventare für das Bauwesen durch das Bundesamt für Bauten und Logistik (BBL) publiziert.

Ergänzend wurden die **ökologischen Aspekte von Lüftungsanlagen** [1] untersucht. Es bestätigte sich, dass durch den Einsatz eines Lüftungssystems gegenüber natürlicher Lüftung eine grosse Reduktion der Umweltbelastung erreicht werden kann. Bezüglich des Anlagebaus erreichen Systeme mit zentraler Lüftungsanlage und Erdregister die ökologisch besten Werte. Die Umweltbelastung von Herstellung und Entsorgung der Lüftungsanlage macht rund 50% bis 70% der Gesamtbelastung aus. Die Varianten mit Polyethylen-Rohren zeigen klare Vorteile gegenüber jenen mit verzinkten Stahlblechrohren.

Die neuen *Ecoinvent*-Daten wurden bereits zur **Beurteilung von Solargebäuden über deren Lebenszyklus** [2] verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass Niedrigenergiegebäude mit unterschiedlicher Bauweise für deren Erstellung eine vergleichbare Belastung aufweisen. Am stärksten wird die Umweltverträglichkeit durch die Reduktion des Betriebsenergiebedarfs beeinflusst.

Um solche Untersuchungen in Zukunft auch für die Praxis zu ermöglichen, werden vereinfachte Analysewerkzeuge bereitgestellt. So wurde das **Programm OGIP** für die integrale Ermittlung von Kosten, Energieverbrauch und Umweltbelastung mit privaten Mitteln vollständig überarbeitet und die Datenbasis den neuen *Ecoinvent*-Daten angepasst (www.the-software.de/BauenUmwelt.html). Das Programm wird an der *Swissbau* 2005 den Anwendern vorgestellt.

Um Bauprojekte hinsichtlich ihrer Umweltbelastung noch einfacher beurteilen zu können, wird gemeinsam mit dem Verein *eco-bau* (früher *KÖB*) ein **elektronischer Bauteilkatalog** [3] entwickelt. Mit diesem soll es möglich sein, auf der Basis des SIA 380/1-Nachweises und des Bauteilkatalogs ein Bauprojekt sowohl energetisch wie auch ökologisch beurteilen zu können.

Für ein integrales Vorgehen zur Weiterentwicklung des Bauwerks Schweiz werden strategische Entscheidungsgrundlagen benötigt. Eine solche wird im Projekt **SIA Effizienzpfad Energie** im Rahmen des Projekts **energycodes** (www.energycodes.ch) erarbeitet. Aufgezeigt wird, wie sich der Energiebedarf von Gebäuden in den nächsten Dekaden entwickeln soll und in welchem Verhältnis dieser zur benötigten grauen Energie und zur induzierten Mobilität steht.

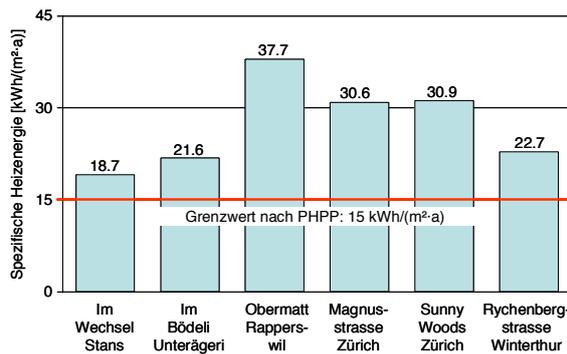
Die ökologische Beurteilung von einzelnen Bauteilen ist wichtig, sie vermag jedoch den Aspekten einer nachhaltigen Stadtentwicklung nicht genügend Rechnung zu tragen. Deswegen werden zusammen mit dem Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), dem Bundesamt für Wohnungswesen (BWO) und den lokalen Behörden und Institutionen, Quartierentwicklungsprojekte durchgeführt [4]. Ziel der Projekte ist es, die Aspekte der nachhaltigen Entwicklung vom einzelnen Gebäude loszulösen und im Kontext ganzer Quartiere zu sehen. Dadurch erhalten die Projekte den notwendigen Bezug zu sozio-ökonomischen Aspekten. Im Berichtsjahr wurden die Möglichkeiten und Bedürfnisse für eine **nachhaltige Quartierentwicklung in Basel** [5a], **Lausanne** [6], **Luzern** [7] und **Zürich** [8] untersucht und erste konkrete Entwicklungsprojekte gestartet.

PASSIVE SONNENENERGIENUTZUNG / GEBÄUDESYSTEME

Für die energieeffiziente Bauweise sind optimierte Gesamtkonzepte und der ausgewogene Einbezug von erneuerbaren Energien ein wichtiges Anliegen. Im Vordergrund stehen Gebäude, welche den *Minergie-* resp. den *Minergie-P-* oder den *Passivhaus-Standard* erfüllen.

Das IEA-Projekt **Solar Sustainable Housing** [9] hat international die erfolgreichsten Gebäudekonzepte untersucht und umfangreiches Planungsmaterial zusammengestellt. Die untersuchten Fallbeispiele wurden vom deutschen *C.F. Müller Verlag* veröffentlicht [41]. Mitte 2005 werden alle Projektergebnisse publiziert sein. Eine Marktanalyse wird ebenfalls dabei sein, welche die Chancen und Hindernisse für *Minergie-P* resp. *Passivhäuser* analysiert [10].

Eine **vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser** [11] wurde durch die HTA-Luzern durchgeführt, welche auch Zertifizierungsstelle für Gebäude im *Passivhaus-* resp. *Minergie-P-Standard* ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die in der Schweiz realisierten *Passivhäuser* diesem Standard nicht ganz gerecht werden. Keines der sechs untersuchten Objekte erreicht die Anforderungen gemäss *Passivhaus-Standard*. Die energetischen Planungswerte werden teilweise deutlich überschritten. In den untersuchten Gebäuden liegen die Raumlufttemperaturen im Winter deutlich über 20° C, im Sommer mehrheitlich unter 26° C und die winterliche relative Raumluftfeuchte fällt häufig unter 30%.



Figur 1: Heizenergieverbrauch der sechs ausgemessenen «Passivhäuser» im Vergleich zum Grenzwert gemäss Passivhaus-Institut Darmstadt

Das **Solarpotential von Städten** [12a] untersuchte die EPF Lausanne anhand von drei exemplarischen Quartieren: einer dichten Blockrandbebauung im Zentrum von Basel, einer genossenschaftlichen Wohnsiedlung am Rand von Lausanne sowie einem gewerblichen Entwicklungsgebiet in Meyrin bei Genf. Die Arbeit zeigt auf, welche Möglichkeiten in bestehenden Stadtquartieren für Sonnenkollektoranlagen, Photovoltaikanlagen und Tageslichtnutzung bestehen. Die Ergebnisse werden nun mit denjenigen einer ähnlichen Untersuchung verglichen, welche im Programm *Photovoltaik* durchgeführt wurde.

Ebenfalls an der EPF Lausanne wird im Rahmen eines IEA-Projekts die **Optimierung der Tageslichtnutzung in Gebäuden** [12b] untersucht. Das Ziel ist die Erarbeitung von technischen Lösungsvorschlägen für die intelligente Kombination von Kunst- und Tageslicht. Die Arbeiten werden 2005 abgeschlossen.

Mit verschiedenen neuen Rechenprogrammen, soll die Optimierung von Gebäudekonzepten vereinfacht werden. Dadurch wird es auch für den Planer möglich, mit wenig Aufwand komplexe dynamische Simulationen für Heizung und Kühlung durchzuführen und für seine Gebäudeoptimierung zu nutzen. Das Berechnungsprogramm **bsol** wurde bereits 2003 fertiggestellt und überzeugt durch seine einfache Benutzerführung (www.bsol.ch). Demnächst werden (etwas verspätet) die zwei weiteren Hilfsmittel: **Klimaflächenmethode** [13] und **Helios-Hygro** [14] bereitgestellt, die in erster Linie dazu dienen, im frühen Planungsstadium differenzierte Analysen – auch bezüglich Kühllasten – durchführen zu können. Auch das Hilfsmittel zur Empfehlung SIA 380/4 **Elektrische Energie im Hochbau** wird ergänzt, indem nebst der elektrischen Energie und dem Kältebedarf auch gleich der Wärmebedarf eines Projekts bestimmt werden kann.

GEBÄUDEHÜLLE

Eine der wichtigsten Neuerungen im Gebäudebereich stellt die **Vakuumisolation** dar, da sie nicht nur rund 5 mal besser dämmt als konventionelle Dämmstoffe, sondern auch neue Lösungen ermöglicht. Vor allem für Gebäudesanierungen, Leichtbaufassaden und für die Isolation von Haustechnikapparaten und -geräten, sind platzsparende Wärmedämmungen besonders interessant.

Grösstes Hindernis dieser neuen Technologie ist nicht etwa der Preis, sondern die Lebensdauer, die im Gebäudebereich für 50 und mehr Jahre garantiert werden sollte. Die **Qualitätssicherung** [16] ist deshalb ein Schwerpunkt des IEA-Projekts **High Performance Thermal Insulation in Buildings** [15a], welches von der Schweiz geleitet wird. Aber auch die **Entwicklung neuer Anwendungen** [5b] ist ein wichtiger Bestandteil dieses Projekts. Das Interesse der Baubranche an diesen neuen Dämm Lösungen ist vor allem in der Schweiz ausserordentlich hoch.

Die **Wärmelasten transparenter Bauteile und Sonnenschutzsysteme** wurden an typischen Fassadensystemen am Solarprüfstand der Empa gemessen, und deren Charakteristik wurde im Rahmen eines IEA-Projekts [26b] modelliert. Die verbesserten Beschattungsmodelle wurden in die Gebäudesimulationsprogramme (*TRNSYS*, *Helios*) integriert, sodass nun die sommerliche Solareinstrahlung in Gebäude besser berechnet werden kann.

Wie gut Gebäudesimulationsprogramme wirklich sind, wird gegenwärtig vom IEA-Projekt **Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools** [17] untersucht. Der Schweizer Beitrag konzentriert sich auf das Bereitstellen von qualitativ hochstehenden Testdatensätzen, welche mit dem Solarprüfstand der Empa generiert werden. An diesen Testdatensätzen werden international die Programme, welche den Energiedurchgang durch Fassaden berechnen, getestet. Die Ergebnisse dieser Vergleichstests sind besonders interessant, weil hier ein Vergleich mit repräsentativen Messdaten vorgenommen werden kann.

Nicht nur die Simulation soll Fortschritte machen, sondern auch die Technologie. Das wärmedämmende Fenster ist dafür ein Musterbeispiel. Nirgends wurden im Gebäudebereich in den letzten Jahren ähnliche Fortschritte erzielt. Ein Gebiet, das bisher jedoch noch zu wenig beachtet wurde, ist der sommerliche Wärmeschutz. Das Verhältnis von Tageslichtdurchlass (τ -Wert) zu Gesamtenergiedurchlass (g -Wert) ist noch nicht optimal. An der Universität Basel werden deshalb

neuartige optische Beschichtungen untersucht [18], die möglichst viel Tageslicht durchlassen, die Wärmestrahlung jedoch fast vollständig reflektieren. Das Ziel sind Gläser mit einem g-Wert um 20% und einem τ -Wert um 50%. Heute verfügbare Gläser weisen Werte um 40% respektive 60% auf.

Nebst dem Wärmeschutz und den solaren Gewinnen hat die Luftdichtheit der Gebäudehülle wesentlich an Bedeutung gewonnen. Bei *Passivhäusern* resp. *Minergie-P*-Gebäuden ist sie ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Infolge der erhöhten Anforderung ist jedoch die Messung der Luftdichtheit mit gängigen Methoden oft schwierig und nicht genügend genau. Mit dem Projekt **Messung und Beurteilung der Luftdichtheit von Niedrigenergiehäusern** [19] wurde die Messtechnik verbessert. Allerdings kann die gewünschte Vereinfachung der Messung bei der geforderten Genauigkeit nicht erreicht werden. Damit bleibt die Luftdichtheitsprüfung vermutlich den Problemhäusern und den zertifizierten *Passiv*- und *Minergie-P*-Häusern vorbehalten. Für die rasche Überprüfung der Gebäudehülle bei Bauabnahmen fehlt nach wie vor eine geeignete Methode.

HAUSTECHNIK

Das Programm *Rationelle Energienutzung in Gebäuden* entwickelt keine haustechnischen Komponenten – dies ist Sache anderer Programme; es befasst sich jedoch intensiv mit der optimalen Integration haustechnischer Systeme ins Gebäude. Nebst dem Haustechnikplaner spielen diesbezüglich die Bauherren als Besteller und die Gebäudebetreiber eine ganz wichtige Rolle.

Im Projekt **Bestellerkompetenz im Bereich Gebäudetechnik** [20] wurden Unterlagen (Checklisten, Arbeitshilfen, Zielwerte) geschaffen, die es dem Bauherrn von grösseren Bauten erlauben, seinem Planerteam kompetent und professionell gegenüberzutreten. Die Hilfsmittel sind unter (www.bestellerkompetenz.ch) auf dem Internet verfügbar und werden dort laufend aktualisiert.

Das Projekt **Betreiberkompetenz** richtet sich an die Gebäudeverantwortlichen (Facility Manager), die den optimalen Betrieb komplexer haustechnischer Anlagen sicherstellen sollen. Sicherheit und Energieeffizienz im Betrieb sind für viele Unternehmen ganz wichtige Faktoren. Im Projekt wurden deshalb, basierend auf den Erfahrungen führender Unternehmen, alle wichtigen Betriebs- und Entscheidungsabläufe in standardisierter

Form dokumentiert. Die Arbeiten werden in internationaler Zusammenarbeit im Rahmen des IEA-Projekts **Commissioning of Building HVAC Systems for Improved Energy Systems** [21] durchgeführt.

Obwohl die Verfeuerung fossiler Energieträger monovalent zur Wärmeerzeugung durch eine polyvalente Nutzung (Wärme, Kälte, Strom) abgelöst werden sollte, ist sie noch stark verbreitet. Immerhin sollen die wertvollen fossilen Ressourcen bestmöglich genutzt werden. Mit der **Feldanalyse von kondensierenden Gas- und Ölfeuerungsanlagen** [15b] wurde an 12 sanierten Anlagen untersucht, wie viel Heizenergie durch die Kondensation besser genutzt werden kann. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kondensatmenge in der Realität meist wesentlich geringer ist als erwartet. Sowohl die Kesseltechnik als auch die Systemintegration weisen nach wie vor ein beachtliches Entwicklungspotential auf.

Für die effiziente Energienutzung kommen vor allem in Niedrigenergiehäusern vermehrt integrierte Energiezentralen – sogenannte Kombigeräte – zum Einsatz. Diese heizen das Haus nicht nur, sie lüften gleichzeitig und stellen das Warmwasser bereit. Um diese komplexen Anlagen prüfen und die Technik weiter entwickeln zu können, wurde an der FH Luzern ein **Prüfstand für Kombigeräte** [22] aufgebaut. Erste Messungen können Anfang 2005 durchgeführt werden.

Industrielle Prototypen von Brennstoffzellen werden zurzeit weltweit getestet. Wenig klar ist jedoch, wie diese Systeme dereinst in Gebäude integriert werden sollen. Im Rahmen des IEA-Projekts **Building Integrated Fuel Cell and other Cogeneration Systems** [23] wird deshalb untersucht, welche Leistungscharakteristiken diese Systeme aufweisen und mit welchen Massnahmen eine optimale Systemintegration resp. Energienutzung gewährleistet ist.

Währenddem die Planungsmethoden für den Heiz- und Kühlbedarf weit entwickelt sind, fehlen für die Planung der Warmwasseranlagen entsprechende Werkzeuge. Mit einer **Methode zur Berechnung des Jahresenergieverbrauchs von Warmwasseranlagen** [24] soll diese Lücke geschlossen werden. Damit soll die Grundlage geschaffen werden, um bei der Planung der Anlagen Optimierungen vornehmen zu können. Die Methode konnte im Berichtsjahr noch nicht fertiggestellt werden. Sie wird jedoch 2005 vorgelegt und soll anschliessend evaluiert und in ein EDV-Werkzeug umgesetzt werden.

Nationale Zusammenarbeit

Von den laufenden 28 vom BFE unterstützten Forschungsprojekten wurden 7 Projekte mit **Fachhochschulen**, 12 Projekte mit **ETH-Instituten und Universitäten** und 7 Projekte mit der **Industrie** durchgeführt. An 11 Projekten waren planende **Ingenieurbüros** beteiligt und in 2 Projekten wurde mit **Branchenverbänden** zusammengearbeitet.

Mit den Forschungsprogrammen **Solarwärme**, **Elektrizität** und **Energiewirtschaftlichen Grundlagen** wird eng zusammengearbeitet.

Im Umweltbereich spielt die **Koordinationsgruppe des Bundes für Energie- und Ökobilanzen** eine wichtige Rolle, in welcher nebst dem BFE das BUWAL, das BBL und das ASTRA, aber auch der SIA vertreten sind. An Bedeutung gewinnt auch das **Schweizer Zentrum für Ökoinventare**, welches von Instituten des ETH-Bereichs getragen wird und mit dem weltweit umfassends-

ten Ökoinventar **ecoinvent** international grosse Beachtung findet. Sowohl das BFE wie auch das BUWAL sind im Beirat dieses Zentrums vertreten.

Die Zusammenarbeit mit dem ARE hat zu diversen Siedlungsbezogenen Forschungsprojekten geführt, an denen sich unter dem Titel **Nachhaltige Quartierentwicklung** nun auch das Bundesamt für Wohnungswesen BWO aktiv beteiligt.

Gemeinsame Projekte im Bereich *nachhaltiges Bauen* werden auch mit dem Verein *Ecobau* [3] resp. dem Hochbauamt der Stadt Zürich [8] durchgeführt.

Im Rahmen des nun gut etablierten nationalen Kompetenznetzwerks **brenet** (Building and Renewable Energies Network of Technology, www.brenet.ch) konnten die Zusammenarbeit zwischen den Fachhochschulen und mit der KTI ausgebaut und mit der Industrie interessante Kontakte gepflegt werden.

Internationale Zusammenarbeit

Bei den Europäischen Forschungsprogrammen geniesst der Gebäudebereich zurzeit keine hohe Priorität. Vereinzelt Projekte wurden bei den Demonstrationsprogrammen **Ecobuildings** und **Concerto** eingereicht, die Verhandlungen sind jedoch noch nicht abgeschlossen. Neue Impulse werden sicher von europäischen **Energy Performance Building Directive (EPBD)** ausgehen, welche weitgehende Anforderungen an bestehende und neue Bauten vorsieht und 2006 europaweit eingeführt werden soll.

Weiterhin findet eine gute und intensive Zusammenarbeit mit den **IEA-Programmen Energy Conservation in Buildings and Community Systems (BCS)** und **Solar Heating and Cooling (SHC)** statt. Die Schweiz war im Berichtsjahr an sieben Projekten engagiert:

- **Sustainable solar buildings**, SHC Task 28, Abschluss 2005 [12a]
- **Daylighting buildings in the 21st century**, SHC Task 31, Abschluss 2005 [18b]
- **High performance thermal insulation systems**, BCS Annex 39, Abschluss 2005 [25a]
- **Commissioning of building HVAC systems for improved energy performance**, BCS Annex 31, abgeschlossen [29]
- **Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems**, BCS Annex 42, 2004-2007 [29]
- **Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools**, SHC Task 34, 2004-2006 [29]
- **Performance assessment of solar building envelope components**, SHC Task 27, abgeschlossen [26b]

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die Budgetkürzungen bei *EnergieSchweiz* betreffen in erster Linie die Pilot- und Demonstrationsprojekte. Erfreulicherweise konnten die bereits bewilligten und gestarteten Projekte weitergeführt werden. Die finanzielle Unterstützung erfolgte meistens in Bezug auf eine Teilfinanzierung der nicht amortisierbaren baulichen Mehrkosten sowie als Beitrag an die Erfolgskontrolle. Im Berichtsjahr konnten aufgrund der gekürzten Mittel keine neuen Projekte bewilligt werden. Von 12 laufenden Projekten wurden 6 abgeschlossen.

Eine Übersicht über sämtliche P+D-Projekte wird im Internet auf www.empa-ren.ch/ren/P+D-Kategorien.htm gegeben. Die Internetseite wurde neu gestaltet, sodass nun gezielt nach Gebäudekategorie oder nach Demonstrationsschwerpunkt gesucht werden kann.

GEBÄUDESTANDARDS

P+D-Projekte im Gebäudebereich werden am bekannten Energiestandard *Minergie* gemessen. Um überhaupt als P+D-Projekt anerkannt zu werden, muss mindestens dieser Standard erreicht werden. Angestrebt wird aber der *Passivhaus-* resp. *Minergie-P-*Standard.

Beim Projekt ***Datenerfassung beim Synergiepark für erneuerbare Energien*** [25] ist die Hard- und Software verbessert resp. ausgetauscht worden, damit die Messungen am Gebäude und den Solaranlagen laufend über das Internet durch Interessierte eingesehen werden können. Die erfassten Tages-, Monats- und Jahresdaten werden auf www.synergiepark.ch laufend aktualisiert.

Beim Projekt ***Niedrigenergiehaus Erlenbach*** [26] konnten die Ursachen für den für ein *Minergie*-Gebäude zu hohen Energieverbrauch nur teilweise gefunden werden. Die Lüftungsanlage arbeitete nicht mit dem versprochenen Wirkungsgrad (WRG < 60% statt > 80%), mit zu hohen Luftwechselraten und wenig effizienten Ventilatoren.

Im ***Passivhaus mit Atelier*** in Pratteln [27] konnten mit einer neuen Steuerung diverse Betriebsoptimierungen im Lüftungsbereich vorgenommen werden. Die gewünschten Raumtemperaturen werden nun im Wohnteil und im Künstleratelier problemlos erreicht. Der Schlussbericht liegt vor.

Der ***Kindergarten Paradisli*** in Wil [28] hat ein volles Betriebsjahr hinter sich. Die Messungen zeigen, dass eine Betriebsoptimierung allein nicht genügt, um die angestrebten tiefen Energiever-

brauchswerte zu erreichen. Die Beschattung wird auch im Winter benötigt, um die Blendung durch die grossen Glasflächen zu reduzieren. Dies wirkt sich jedoch negativ auf die passiv-solaren Gewinne aus. Die *Lucido*-Fassade wird dadurch ebenfalls abgedeckt. Als Verbesserung wird vorgeschlagen, zusätzlich zu den Knickarmstoren am Vordach direkt vor den Glasflächen Raffflammenstoren anzubringen. Dies würde auch das unerwünschte Luftpolster unter dem Vordach reduzieren und dadurch den Überhitzungsschutz im Sommer verbessern.

Das Projekt ***Wattwerk – 1. Plusenergie-Gewerbehaus*** [29] in Bubendorf BL wurde anfangs Mai 2004 bezogen und am Tag der offenen Tür einem breiten Publikum vorgestellt. Der zweigeschossige Holzbau mit angrenzender Lagerhalle hat den Luftdichtigkeitstest erfolgreich bestanden und wurde als *Passivhaus* zertifiziert. Das Projekt erhielt 2004 den europäischen Solarpreis in der Kategorie *Betriebe und Unternehmen*. Die Messungen werden 2005 abgeschlossen.

Energieeffizienz war bisher primär den Neubauten vorbehalten. Der schweizerische Energieverbrauch wird jedoch noch sehr lange Zeit durch die bestehende Gebäudesubstanz dominiert. Das Forschungsprogramm will deshalb vermehrt das Schwergewicht auf Gebäudeerneuerungen legen. Mit dem ***Wettbewerb Minergie-P-Sanierungen*** [30] wurden Pilotprojekte gesucht, welche demonstrieren, dass auch für bestehende Bauten energetisch hervorragende und finanziell tragbare Lösungen gefunden werden können. Es wurden drei Projekte prämiert, die nun als Demonstrationsprojekte realisiert werden sollen (Figuren 2 und 3).



Figur 2: Projekt «Neuzeit» mit neuem Attikageschoss. Anstelle von 15 kleinen 3-Zimmerwohnungen weist das Gebäude nun 12 grosszügige Duplexwohnungen auf. 1. Rang [30] (Architekt Beat Kämpfen, Zürich)



Figur 3: Projekt «Birsebene» mit neuen 6 1/2-Zimmerwohnungen im ausgebautem Dachgeschoss. Durch Integration der Balkone in den Wohnbereich (auf der Rückseite) und durch Umstrukturierungen konnten die Grundrisse wesentlich verbessert werden. 2. Rang [30] (Architekten Suter+Partner, Basel)

Die *Minergie-P*-Sanierungen **Umbau Nietengasse** in Zürich [31a] und **Sanierung Zwinglistrasse** [31b] sind abgeschlossen. Beim Gebäude *Nietengasse* waren die Auflagen durch die Denkmalpflege so hoch, dass der *Minergie-P*-Standard nicht ganz erreicht werden kann. Vorteilhafter ist die Sanierung *Zwinglistrasse* 9+15. Der Heizwärmebedarf in der ersten Messperiode lag bei 25 kWh/(m²·a). Die Energiekennzahl nach *Minergie-P* für Heizung und Warmwasser liegt bei 33.7 kWh/(m²·a). Mit den optimierten Einstellungen wird für das zweite Jahr ein Wert unterhalb des Grenzwertes von *Minergie-P* (30 kWh/(m²·a)) erwartet.

HAUSTECHNIK

Die Erfolgskontrolle beim **Minergie-P-Gebäude mit Gratec-Isolation und Luftkollektorsystem** [33] in Degersheim wurde abgeschlossen. Der Luftkollektor mit selektiver Beschichtung des Absorbers hat sich bewährt. Trotz ungünstiger Geometrie wird der Kollektor sehr gut durchströmt. Der Planer führt dies auf den steilen Anstellwinkel des Kollektors und die speziell auf die Luftführung abgestimmte Unterkonstruktion der Glashalterung zurück. Das Gebäude besitzt keine Komfortlüftung, welche bei *Minergie*, *Minergie-P* und dem *Passivhaus-Standard* zwingend vorgeschrieben wäre. Trotzdem werden die Wärmebedarfswerte *Minergie-P* unterschritten. Die verwendete *Gratec-Isolation* aus Glasfasern hat sich bewährt. Es wurde auch keine Setzung des Dämmstoffs beobachtet.

Beim Projekt **CO₂-basierte Lüftungssteuerung für ein Wohnhaus** in Wald [34] kommen neu entwickelte, kostengünstige CO₂-Sensoren zum Ein-

satz. Generell hat sich die Steuerung bewährt. Allerdings mussten die Luftvolumenströme auf den einzelnen Stufen reduziert werden, da die CO₂-Konzentrationen bereits auf der ersten Stufe sehr tiefe Werte erreichte. Die dadurch erzielte Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs wird im Schlussbericht 2005 dargestellt werden. Untersucht wird auch eine automatisierte Fensterlüftung, welche seit der Inbetriebnahme gut funktioniert. Als störend werden die Antriebsgeräusche beim Öffnen und Schliessen der Fenster empfunden.

Die Studie **Sanierung Wohnsiedlung Himmelrich** in Luzern [35] untersuchte im Vorfeld einer grossen Sanierung die Möglichkeiten des Einbaus einer Komfortlüftung in eine bestehende Wohnsiedlung. Die engen Platzverhältnisse, wie sie für ältere Wohnsiedlungen typisch sind, liessen nur eine beschränkte Anzahl Varianten zu. Die Lösung mit zentralem Lüftungsgerät schnitt energetisch am besten ab, dicht gefolgt von der Variante mit Platzierung des Lüftungsgerätes in einer Balkonische. Energetisch ungenügend erwies sich eine Abluftanlage mit Nachströmöffnungen in neuen Fenstern.

GEBÄUDEHÜLLE

Primär an der Gebäudehülle setzt die **Sunfactory in Tramelan** [36] (Berner Jura) an. Sie will einzelne Gewerbebauten unter einer gemeinsamen Gebäudehülle zusammenfassen, um so den Wildwuchs von Einzelbauten einzudämmen und gleichzeitig die Energie optimal zu nutzen. Mit einem Vorprojekt [36] wurde nun ermittelt, unter welchen Bedingungen Energieverbrauch und Nutzungskomfort optimiert werden können. Die Untersuchung zeigt, dass in Tramelan (910 m.ü.M.) nur eine doppelt verglaste Hülle Frostfreiheit im Innern gewährleisten kann. Dafür kann sowohl im Winter wie auch im Sommer mehrheitlich mit einem sehr komfortablen Innenklima gerechnet werden (Winter +10 K, Sommer +2 K). Voraussetzung ist jedoch, dass der freie Boden als Speichermasse für den Tag/Nacht-Ausgleich genutzt werden kann und die Einbauten massiv ausgeführt werden. Der detaillierte Schlussbericht dieser Untersuchung liegt vor.

Das Projekt **Deckenstrahlung in Eishallen und überdeckten Ausseneisfeldern** [37] umfasst drei Teile. Im ersten Teil wird der Einfluss einer nachträglich installierten, IR-reflektierenden Deckenuntersicht auf den Wärme- und Kältebedarf der Hockeyhalle in Dübendorf messtechnisch untersucht. Die Aluminium-Deckenuntersicht konnte im Berichtsjahr installiert werden. Sie stösst bei den Nutzern auf breite Akzeptanz. Durch die

neue Deckenuntersicht haben sich die Beleuchtungsverhältnisse in der Halle stark verbessert, ohne dass dafür akustische Beeinträchtigungen in Kauf genommen werden mussten. Erste Auswertungen der Messresultate lassen darauf schließen, dass sich die Aluminiumdeckenuntersicht auch energetischen positiv auswirkt. Die endgültigen Daten liegen im Sommer 2005 vor.

Im zweiten Teil werden die Emissionseigenschaften von geeigneten Materialien in Abhängigkeit von Alterung und Verschmutzung untersucht. Hier wurden im Berichtsjahr keine Arbeiten durchgeführt.

Das dritte Teilprojekt befasst sich mit einer einfachen Eternit-Ausseneisfeld-Überdachung, die im Sommer 2003 erstellt und versuchsweise auf der Innenseite mit einem reflektierenden Alublech ergänzt wurde. Zusätzlich wurde eine gleich grosse Dachfläche direkt aus Aluminiumblech erstellt. Anhand der Messungen kann nachgewiesen werden, dass an der Aluminiumkonstruktion bis zu 40 %, an der Alu-beschichteten Eternitkonstruktion bis zu 35 % weniger Taupunkt-Unter-

schreitungen in Kauf genommen werden müssen als bei der Eternitüberdachung. Dies bedeutet, dass eine metallische Überdachung den Strahlungsaustausch wirksam reduziert.

Das Projekt **SOLARIX-Wandheizsystem** [38] wurde an der *Hausbau- und Minergie-Messe* vorgestellt. *Solarix* ist eine neu entwickelte Solarfassade mit transparenter Wärmedämmung TWD (aussen) und vorgefertigten 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. Ost-, Süd- und Westfassade eines Pilotprojekts sollen mit dem *Solarix*-System ausgelegt werden. Messungen an einer Modellwand wurden 2004 weitergeführt. Die Anbindung des Systems an das Erdreich wurde mit Simulationen verifiziert. Der Nachweis, dass sich überschüssige Wärme ins Erdreich einlagern lässt, wurde rechnerisch nachgewiesen. Für die Eigentumswohnungen wurden leider noch nicht genügend Käufer gefunden, sodass sich der Baubeginn für das Demonstrationsprojekt auf Frühjahr 2005 verzögert.



Figur 1: Zustand vor Sanierung mit Faserholzdecke



Figur 2: Neuinstallierte Aluminium-Deckenuntersicht

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Bedingt durch die reduzierte Unterstützung von Pilot- und Demonstrationsbauten, aber auch durch erneute Budgetreduktionen konzentrierte sich das Programm hauptsächlich auf den Abschluss laufender Vorhaben.

Im April wurde der Eidg. Energieforschungskommission CORE die Programmschwerpunkte für die

Jahre 2004–2007 vorgestellt [39]. Die auf dem neuen Forschungsplan basierende Projektaus-schreibung konnte jedoch aus Budgetgründen erst auf Ende Jahr lanciert werden. Die aus-geschriebenen Schwerpunkte sind:

- **Alternative Kühlkonzepte für Niedrig-energiebauten**

- **Minimierung Elektrizitätsverbrauch**
 - **Effizienzpotentiale bedarfsgeregelter Systeme**
 - **Entwicklung hochisolierter Bau- und Anlageteile mit integrierten Vakuum-Isolationspaneelen**
 - **Ökologische Beurteilung neuer Energiesysteme**
 - **Energieaspekte städtischer Quartiere und Agglomerationen**
 - **Umweltauswirkungen von Energiestandards**
- Parallel dazu sollen weitere Anstrengungen unternommen werden, die Bauerneuerung einerseits im Rahmen der IEA-Zusammenarbeit zu thematisieren und andererseits neue Projekte zu starten.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

(ZB) Zwischenbericht vorhanden.

Sämtliche Jahres- und Schlussberichte können unter www.empa-ren.ch heruntergeladen werden.

- [1] W. Hässig, (werner.haessig@bhz.ch), Basler & Hofmann, Zürich: **Ökologische Aspekte von Komfortlüftungen** (SB)
- [2] A. Lalive, (alalive@bhz.ch), Basler & Hofmann, Zürich: **Ökologische Optimierung von Solargebäuden über deren Lebenszyklus** (Beitrag IEA/SHC Task 28) (SB)
- [3] M. di Paolantonio, (m.dipaolantonio@holligerconsult.ch), Holliger Consult GmbH, Epsach: **Realisierung elektronischer Bauteilkatalog**
- [4] R. Stulz, (roland.stulz@novatlantis.ch), novatlantis, Zürich: **Projektkoordination Nachhaltige Quartierentwicklung** (JB)
- [5] A. Binz, (a.binz@fhbb.ch), FHBB, Muttetz: **a) Nachhaltige Quartierentwicklung Basel Gundeldinger Feld** (ZB) ♦ **b) Vakuum-Dämmung im Baubereich – Systeme und Applikationen** (Beitrag IEA BCS Annex 39) (JB)
- [6] J.-B. Gay, (gay@lesopc67.epfl.ch), EPF LESO-PB, Lausanne: **Nachhaltige Quartierentwicklung Lausanne Bellevaux** (ZB)
- [7] J. Inderbitzin, (buero.bitzi@bluewin.ch), HSW, Luzern: **Nachhaltige Quartierentwicklung Luzern Basel-Bernstrasse** (ZB)
- [8] W. Ott, (walter.ott@econcept.ch), Econcept, Zürich: **Nachhaltige Quartierentwicklung Zürich Werdwies** (ZB)
- [9] R. Hastings, (robert.hastings@freesurf.ch), AEU, Wallisellen: **a) IEA/SHC Task 28: Sustainable Solar Buildings (Nachhaltige Solar-Wohnbauten)** (JB)
- [10] T. Andris, (tom.andris@renggli-haus.ch), Renggli AG, Schötz: **Marktanalyse Passivhaus Schweiz** (Beitrag IEA/SHC Task 28)
- [11] B. Frei, (bhfrei@hta.fhz.ch), Luzern/Horw: **Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser** (SB)
- [12] J.-L. Scartezzini, (jean-louis.scartezzini@epfl.ch), EPF LESO-PB, Lausanne: **a) Optimisation du potentiel d'utilisation de l'énergie solaire en milieu urbain** (SB) ♦ **b) Daylighting Buildings in the 21st Century (IEA/SHC Task 31)** (JB)
- [13] B. Keller, (bkeller@hbt.arch.ethz.ch), Professur für Bauphysik, ETH, Zürich: **Weiterentwicklung der Klimafächenmethode und -software zu erhöhter Praxisverwendbarkeit** (JB)
- [14] Th. Frank, (thomas.frank@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Überarbeitung Programm HELIOS**
- [15] M. Erb, (markus.erb@eicher-pauli.ch), Eicher+Pauli AG, Liestal: **a) High Performance Thermal Insulation in Buildings (IEA/BCS Annex 39)** (JB) ♦ **b) Feldanalyse von kondensierenden Gas- und Ölfeuerungsanlagen** (SB)
- [16] H. Simmler, (hans.simmler@empa.ch), EMPA-Dübendorf: **a) Vakuum-Dämmsysteme im Baubereich – Qualitätssicherung und bauphysikalische Grundlagen (IEA/BCS Annex 39)** (JB) ♦ **b) Messung und Simulation von transparenten Bauteilen mit Sonnenschutz (IEA/SHC Task 27)** (JB)
- [17] H. Manz, (heinrich.manz@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Empirische Validierung von Gebäudesimulationsprogrammen (IEA/SHC Task 34)** (JB)
- [18] A. Romanyuk, (andriy.romanyuk@unibas.ch), Universität Basel: **Neue optische Beschichtungen für transparente Gebäudeteile im Hinblick auf einen verbesserten sommerlichen Wärmeschutz** (JB)
- [19] Ch. Tanner, (christoph.tanner@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Messung und Beurteilung der Luftdichtigkeit von Niedrigenergiehäusern** (SB)
- [20] Hp. Eicher, (hanspeter.eicher@eicher-pauli.ch), Eicher+Pauli AG, Liestal: **Bestellerkompetenz im Bereich Gebäudetechnik**, <http://www.bestellerkompetenz.ch> (SB)
- [21] J.-M. Chuard, (chuard@enerconom.ch), Enerconom, Bern: **Commissioning of Building HVAC Systems for Improved Energy Performance** (IEA BCS Annex 40) (JB)
- [22] R. Furter, (rfurter@hta.fhz.ch), HTA, Luzern/Horw: **Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte für Komfortlüftung** (JB)
- [23] V. Dorer, (viktor.dorer@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Building Integrated Fuel Cell and other Cogeneration Systems (IEA/BCS Annex 42)** (JB)
- [24] E. Füglistner, (erich.fueglistner@amstein-walthert.ch), Amstein+Walthert AG, Zürich: **Methode zur Berechnung des Jahresenergieverbrauchs von Warmwasseranlagen** (JB)

Liste der P+D-Projekte

- [25] Peter Schibli, (synergiepark@bluewin.ch) Heizplan AG, Gams: **Datenerfassung Synergiepark für erneuerbare Energien** (JB)
- [26] Th. Nordmann, (nordmann@tnc.ch), Erlenbach: **Messprojekt Niedrigenergiehaus Erlenbach** (SB)
- [27] Reto Miloni, (miloni@swissonline.ch) Lichtplanung Miloni, Mülligen: **Passivhaus mit Atelier, Pratteln** (SB)
- [28] D. Grob, (grob-schoepfer@tbwil.ch) Grob Grob und Schöpfer AG, Wil: **Kindergarten Paradisli**, (SB)
- [29] H. Holinger, (heinrich@holinger-solar.ch), Holinger Solar AG, Liestal: **Wattwerk- erstes Plusenergie-Gewerbehaus** (JB)
- [30] H. Weber, (heinz.weber@ibe.ch), ibe, Bern: **Durchführung Ideen-Wettbewerb für Passivhaus-Sanierungen**
- [31] K. Viridén, (viriden@viriden-partner.ch), Viridén+Partner, Zürich: **a) Umbau Nietengasse 20 – mit bestehender Backsteinfassade** (SB) • **b) Passivhaus-Umbau Zwinglistrasse** (JB)
- [32] M. Stüssi, (mstuessi@dplanet.ch) Barga: **Neubau Zweifamilienhaus Im Tal 8233 Barga SH, Heizung - Warmwasser - Wäschetrocknung mit einer Duplex-Wärmepumpe**
- [33] A. Gütermann, (amena.ag@energienetz.ch), amena ag, Winterthur: **a) Minergie-P-Gebäude mit Gratec und Luftkollektorsystem** (SB)
- [34] W. Hässig, (whaessig@BHZ.ch), B+H, Zürich: **CO₂-basierte Lüftungssteuerung für ein Wohnhaus** (JB)
- [35] B. Züsli, (beat.zuesli@bluewin.ch), Architekt, Luzern: **Sanierung Wohnsiedlung Himmelrich in Luzern: Varianten Wohnungs Lüftung** (SB)
- [36] Ch. Kulemann, (christine.kulemann@amstein-walthert.ch), Amstein+Walthert AG, Zürich: **Vorabklärungen Pilotprojekt Sunfactory Tramelan** (JB)
- [37] F. Gachnang, (gachnang@eta-energietechnik.ch), eta Energietechnik, Winterthur: **Deckenstrahlung in Eishallen und überdeckten Ausseneisfeldern** (JB)
- [38] P. Oesch, (p.oesch@twdmueller.ch), Gebr. Mueller AG, Bern: **P+D-Projekt mit Messungen SOLARIX- Wandheizsystem Solarix** (JB)

Referenzen

- [39] M. Zimmermann: **Rationelle Energienutzung in Gebäuden - Forschungs- und Demonstrationsprogramm 2004-2007**, Empa, März 2004
- [40] M. Zimmermann et al, E. Jochem (editor): **Steps towards a sustainable development – A white Book for R&D of energy-efficient technologies**, novatlantis, March 2004
- [41] Hoffmann C, Hastings H., Voss K.: **Wohnbauten mit geringem Energieverbrauch**, C. F. Müller Verlag, Heidelberg, 2005, ISSN 3-7880-7749-2

VERKEHR / AKKUMULATOREN

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Martin Pulfer

martin.pulfer@bfe.admin.ch



Hauslieferdienst Migros Höngg

Anknüpfend an das EnergieSchweiz-Programm *NewRide* führt Migros Höngg zusammen mit dem EWZ einen Hauslieferdienst durch. Dieser Hauslieferdienst demonstriert die Energieeffizienz und Zuverlässigkeit der E-Bikes und baut auch anderweitige Vorurteile ab.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Nach wie vor ist **in der Schweiz** der **Verkehr der grösste Energieverbraucher**. Gegenwärtig benötigt er, bei zumeist steigender Tendenz, rund einen Drittel der Endenergie in unserem Land. Mit 48,6% (Stand 2000, inkl. Flugverkehr) hat er auch den höchsten Anteil an den Emissionen des Treibhausgases CO₂.

Rund 50% der Fahrten mit Personenwagen sind kürzer als 5 km. In dieser Distanz werden bis zu 5-mal mehr Kohlenwasserstoffe, 2.5-mal mehr NO_x und 10% mehr CO₂ emittiert als in der nachfolgenden Phase eines warmgelaufenen Motors. 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 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.

Das Forschungsprogramm **Verkehr** untersucht Ansätze und Massnahmen zur Absenkung des Energieverbrauchs im Verkehr, insbesondere beim Hauptverbraucher, dem motorisierten Individual-

verkehr. Erreicht werden sollen damit auch eine Reduktion der Umweltbelastung sowie die Stärkung des Industriestandorts Schweiz durch innovative Technologien und Systeme.

Eine Verringerung des Energieverbrauchs beim Individualverkehr wird dabei insbesondere mit folgenden Ansätzen angestrebt:

- leichtere und/oder kleinere Fahrzeuge
- effizientere Antriebsstränge
- angepasstes Mobilitätsverhalten

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

- *Zebrabatterie*: System mit sehr hoher Energiedichte, nahe der Marktreife und einem weiterhin vorhandenen grossen Verbesserungspotential
- *Super-Cap*: Hochleistungskondensatoren mit einer sehr hohen Leistungsdichte (aber tieferen Energiedichte) und einer sehr langen Lebensdauer
- *Bleiakkumulatoren*: bewährte, aber immer noch verbesserungsfähige Batterien
- *Lithiumionen- und Polymerbatterien*: Systeme mit der derzeit höchsten Energiedichte

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

VERKEHR

Grundlagen

Das auf drei Jahre angesetzte EU-Forschungsprojekt **CLEANER DRIVE** [1], das in der Schweiz vom Verband *e'mobile* betreut wird, hat das Ziel, das Know-how, die Erfahrungen und die laufenden Aktivitäten hinsichtlich Markteinführung von umweltschonenden Fahrzeugen in europäischen Ländern zu koordinieren, weitgehend erreicht. Dabei wurde eine konsistente Methode für eine Umweltbewertung von Fahrzeugen entwickelt und im Sinne eines Pilotprojekts auf einer Website getestet. Das *Cleaner Drive*-Umweltbewertungssystem wurde in eine Entscheidungshilfe für die Fahrzeugbeschaffung integriert, welche dazu beiträgt, den Umweltkriterien beim Fahrzeugkauf vermehrt Beachtung zu schenken (Hauptzielgruppe: Flottenbetreiber). Schliesslich wurden die Hindernisse punk-

to Infrastruktur für die Einführung der gasförmigen Treibstoffe Erdgas und Wasserstoff untersucht.

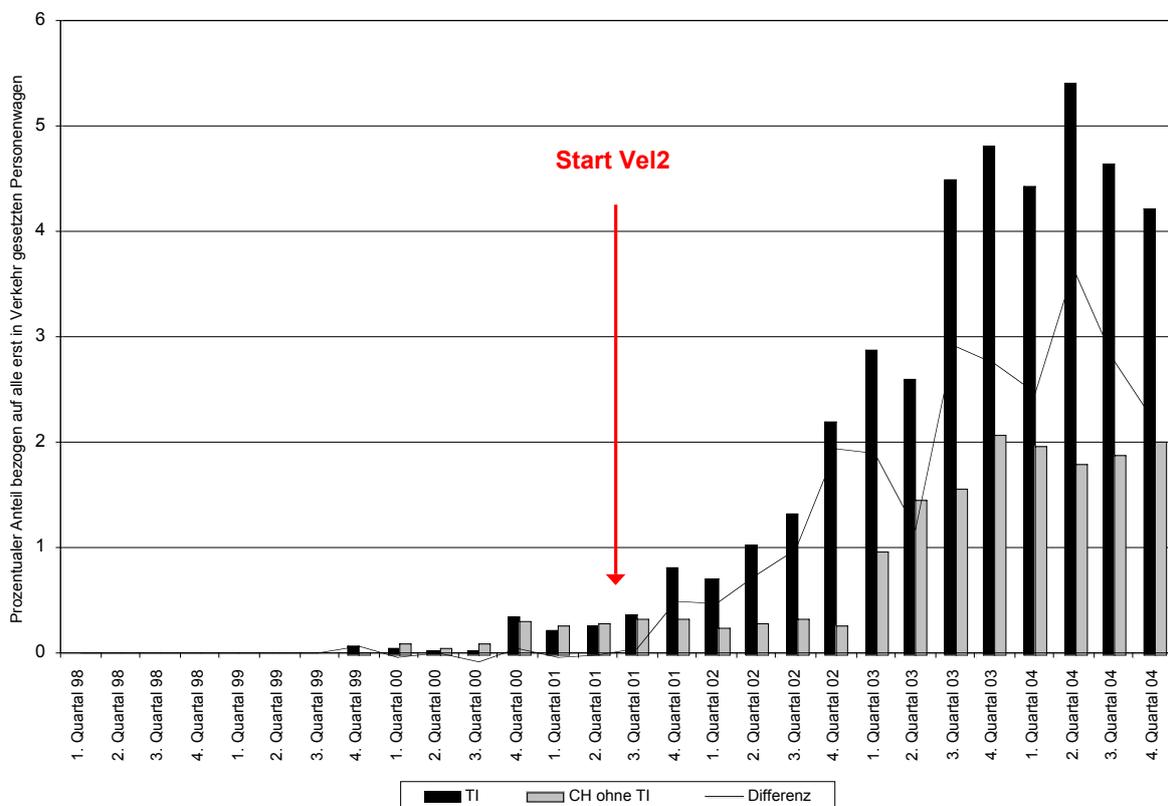
Im dritten Projektjahr wurden Stellungnahmen für das *Cleaner Drive*-Umweltbewertungssystem gesammelt und ausgewertet. Daraufhin wurde das System überarbeitet und am Genfer Autosalon 2004 am Stand *EcoCar* von *e'mobile* der Öffentlichkeit vorgestellt. Im Verlauf des letzten Jahres wurden intensive Gespräche über eine Fortsetzung des Projekts geführt. Im Vordergrund stehen dabei eine Aktualisierung der Fahrzeugdaten für das Umweltbewertungssystem, eine Weiterentwicklung der Methodik, ein verstärktes Marketing für die Website sowie eine Ausdehnung auf andere EU-Staaten. Eine Gruppe aus dem *Cleaner Drive*-Consortium ist daran, einen Vorschlag für den *second call* von *STEER* im Rahmen des Programms *Intelligent Energy for Europe* (Ausschreibung voraussichtlich im Herbst 2005) auszuarbeiten.

Das Cleaner Drive **Umweltbewertungssystem** berechnet für jedes Fahrzeug den sogenannten *Cleaner Drive-Index*, eine dimensionslose Umweltbewertungszahl zwischen 100 und 1. Berücksichtigt werden Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O) und Luftschadstoffe (CO, HC, NO_x, PM₁₀, SO₂) sowohl beim Betrieb des Autos als auch bei der Herstellung des Treibstoffs. Die Gewichtung der einzelnen Indikatoren erfolgt über externe Kosten, basierend auf dem EU-Projekt *ExternE*. Das Umweltbewertungssystem wurde in eine Website integriert und für den Benutzer als Entscheidungshilfe beim Autokauf anwendbar gemacht.

Ende 2001 hat die EU in einer Richtlinie eine Zielvorgabe für den Einsatz von **alternativen Treibstoffen** bis ins Jahr 2020 gesetzt. Danach soll der Anteil von Erdgas und Wasserstoff am gesamten Treibstoffverbrauch in der EU auf 10 resp. 5% ansteigen. Der Aufbau des Tankstellennetzes gilt als grösste Hürde zur Erreichung des EU-Ziels für 2020. Die Kosten für den Aufbau eines flächendeckenden Tankstellennetzes für Methan (Erdgas und Biogas/Kompogas) wurden aufgrund der aktuellen Preise abgeschätzt, wobei aufgrund der zu erwartenden technologischen Entwicklung von einer Kostenreduktion von 30–50% (je nach

Tankstellentyp) ausgegangen wurde. Aus diesen Berechnungen resultiert ein gesamtes Investitionsvolumen von 10 bis 12 Milliarden Euro. Ein analoger Ansatz ergab für den Aufbau eines Tankstellennetzes für Wasserstoff ein Investitionsvolumen von 26 Milliarden Euro (nur 5% des gesamten Treibstoffverbrauchs). Zur Zeit existieren erst wenig Tankstellen für Wasserstoff. Deshalb wurde diese Extrapolationsmethode mit einer Analyse verschiedener Studien erhärtet. Insgesamt wurden 79 verschiedene Wasserstoffpfade miteinander verglichen. Sie führten zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen, mit einem Durchschnittswert für die Investitionen von 36 Milliarden Euro.

Die Forschungsarbeit **Finanzielle Anreize für effiziente Fahrzeuge** [2] wird im Auftrag der beiden Bundesämter ASTRA und BFE durchgeführt. Ziel ist das Erstellen einer umfassenden Wirkungsanalyse der finanziellen Anreize für effiziente Fahrzeuge im Rahmen von *VEL2* und *NewRide*. Zu diesem Zweck setzt sie sich vertieft mit folgenden übergeordneten Themenbereichen auseinander: Systematische Übersicht über mögliche Ansätze für finanzielle Anreize im Fahrzeugsektor, Begleitende Wirkungsanalyse der finanziellen Anreize in den Projekten *VEL2* und *NewRide* sowie Vergleich



Figur 1: Entwicklung der Verkäufe der Fahrzeuge der Effizienzklasse A im Fördergebiet Tessin im Vergleich zur übrigen Schweiz. Durch die Förderung werden im Kanton Tessin energieeffiziente Fahrzeuge markant häufiger gekauft.

mit anderen Ansätzen. Die bisher erhaltenen Resultate führen zu folgenden Erkenntnissen:

- Der Bekanntheitsgrad der Förderprogramme *VEL2* und *NewRide* ist im Vergleich zum Bekanntheitsgrad, den das Förderprogramm *VEL1* erreicht hat, geringer. Dies weist auf ein noch brachliegendes Potenzial hin
- Der Bekanntheitsgrad eines Förderprogramms wird einerseits durch die Länge seiner Laufzeit und andererseits durch markante Anlässe wie zum Beispiel die Basler Aktion *die bessere Mobilität* gefördert. Subventionen haben nicht nur eine direkte, sondern auch eine nicht zu unterschätzende, indirekte PR-Wirkung. Dies ist insbesondere zu Beginn des Programms von grossem Nutzen. Mit der Zeit werden die Subventionen für den Kunden jedoch zu einer Selbstverständlichkeit, und der reale Preis des Fahrzeuges wird nicht mehr akzeptiert
- Die Margen für die Elektrozweiräder sind im Vergleich zu den Margen für konventionelle Fahrräder viel geringer, was dazu führt, dass die E-Bikes für den Händler ein weniger attraktives Verkaufsprodukt darstellen
- Der doppelt so grosse Anteil neu in Verkehr gesetzter effizienter Fahrzeuge im Vergleich zum schweizerischen Mittel kann auf *VEL2* zurückgeführt werden (Fig. 1). Unklar ist noch, welche Massnahme von *VEL2* für diese Wirkung ausschlaggebend ist. Wichtige Voraussetzungen für den Erfolg von effizienten Fahrzeugen sind gemäss Händler ausgereifte Produkte sowie zuverlässige und innovative Hersteller. Aufgrund dieser Erkenntnisse lässt sich folgender Handlungsbedarf ausmachen:
 - Steigerung des Bekanntheitsgrads der Förderangebote mit geeigneten Mitteln
 - Qualitätssicherung der bezüglich Produkte und Hersteller erhöhen
 - Ev. Händlermargen für E-Bikes erhöhen

Im Projekt **Innovative Fahrzeugflotte** [19] der novatlantis-Pilotregion Basel wurden mit Unterstützung des BFE wichtige Erkenntnisse für die Umsetzung der alternativen Treibstoffe Erdgas und Biogas sowie langfristig Wasserstoff erarbeitet. Die Broschüre *Gas im Tank, Duft in der Luft?* fasst die Erkenntnisse der umfangreichen Akzeptanzuntersuchungen zu den alternativen Treibstoffen für Entscheidungsträger und Interessierte zusammen. Aufbauend auf den Bürgerdialogen führte das novatlantis-Team eine repräsentative Marktumfrage bei 1000 Personen in der Deutschschweiz durch. Dabei zeigte sich neben vielen weiteren Ergebnissen, dass die überwiegende Mehrheit der Befragten den Treibstoff

Erdgas im Vergleich zu Benzin als umweltfreundlicher und in etwa gleich sicher einschätzt, wohingegen der Preisvorteil von Erdgas als Treibstoff noch weitgehend unbekannt ist. In einer von der Harvard University mitfinanzierten Fallstudie des novatlantis-Teams zur Rolle der *public-private partnerships* bei der Einführung innovativer Technologien wurde am Beispiel der Pilotregion aufgezeigt, dass im Rahmen gemeinsamen Lernens die konkrete Implementierung in gemeinsamen Projekten ein entscheidender Erfolgsfaktor ist. In diesem Sinne wurde Anfang 2004 das novatlantis-Projekt *Erlebnisraum Mobilität* gestartet. Hier werden die Aktivitäten in der Pilotregion Basel zur Umsetzung der Treibstoffe Erdgas und Biogas und zur Demonstration von Wasserstoffmobilität gebündelt und koordiniert. Die Partnerschaft im Bereich Mobilität wurde neben dem BFE von den Ämtern für Umwelt und Energie der Kantone Basel-Landschaft und Basel-Stadt, den Industriellen Werken Basel (IWB) und dem Gasversorger GVM (Gasverbund Mittelland) gestartet. Die gemeinsamen Aktivitäten umfassen den Test führender Erdgas-Fahrzeugtechnologie im Alltags Einsatz, die sichtbare Einbindung von Flottenbetreibern als Nutzer von Erdgas und Biogas als Treibstoff, die Demonstration von neuen Ansätzen bei der Wasserstoffmobilität, sowie Veranstaltungen für und Dialog mit Bürgern und Bürgerinnen sowie Entscheidungsträgern. Das BFE unterstützt dabei seit November 2004 besonders die Vorbereitung und Begleitung der Umsetzung von Hybrid- und Erdgastaxis in der Region Basel.

Ziel des Projekts **Demo-Gerät CO₂-Effekt** [20] war die Entwicklung einer stark verbilligten Version des Demonstrationsgerätes zum Treibhauseffekt zu entwickeln, die als Lehrmittel für Schulen erschwinglich sein sollte. Dieses Ziel ist erreicht worden. Wie im Projektantrag in Aussicht gestellt, konnte der Preis des Gerätes um fast zwei Drittel gesenkt werden. Wichtig war, dass dabei das lernpsychologisch begründete und in vielen Praxiseinsätzen bewährte Versuchsparadigma beibehalten werden konnte.

ANTRIEBSSTRANG

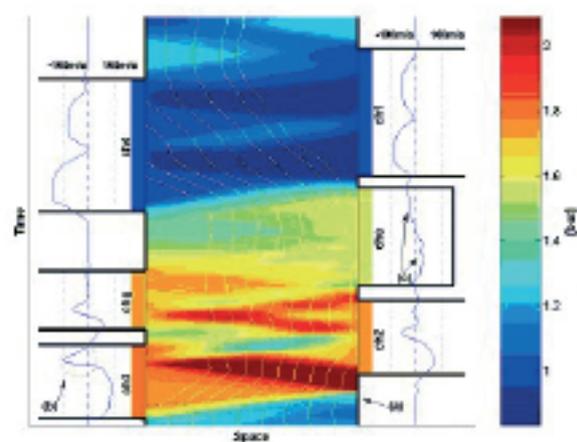
Das Projekt **Palos II** [3a] befasst sich mit der Erhöhung des Teillastwirkungsgrads von Antriebssystemen sowie den Nebenaggregaten im Fahrzeug:

Aufladung: Der Wirkungsgrad eines Ottomotors kann im Teillastbereich (z.B. im städtischen Verkehr) verbessert werden, indem der Hubraum reduziert wird. Werden ebenso hohe Leistungen erwartet, kann der Motor aufgeladen werden, was jedoch meistens eine schlechtere Dynamik

(Fahrbarkeit) des Fahrzeugs mit sich bringt. Für die Aufladung kommen unterschiedliche Aggregate in Frage. In *Palos II* wird schwergewichtig der Druckwellenlader untersucht. Gegenüber dem heute vielfach eingesetzten Abgasturbolader verspricht der Druckwellenlader eine deutlich bessere Dynamik, jedoch ist er steuerungs- und regelungstechnisch schwieriger zu beherrschen, da sich systembedingt Frischluft und Abgase vermischen können. Eine ungewollte Abgasrückführung während Laständerungen gilt es mit geeigneten Regelstrategien zu vermeiden.

Ein Versuchsmotor mit Druckwellenlader wurde aufgebaut, in Betrieb genommen und ausführlich ausgemessen. Wie erwartet, zeigt das System für tiefe Massendurchsätze (Motordrehzahlen) bereits hohe Aufladegrade sowie einen schnellen Druckanstieg bei einem Lastsprung. Beides beeinflusst die Fahrbarkeit des Motors positiv, da das Drehmoment aus tiefer Teillast nach einem Fahrpedalsprung einerseits schneller und andererseits auf einen höheren Wert ansteigt als dies beim Turboladersystem der Fall ist. Die bei bisherigen Druckwellenladersystemen beobachtete Neigung zu ungewollter Abgasrückführung während Laständerungen kann beim neuen System bestätigt werden. Um die Ursachen dieses Effektes umfassend verstehen zu können, wurde ein genaues Modell entwickelt, welches auf der Methode der finiten Differenzen beruht und Effekte wie Leckage, Wärmeverlust und Reibung mit berücksichtigt. Dieses Modell wurde mit den Messdaten validiert und zeigt eine gute Übereinstimmung. Als nächster Schritt wird das Modell vereinfacht, damit es für die Steuerung und Regelung verwendet werden kann.

In den letzten Jahren hat der Energieverbrauch der **Nebenaggregate** im Fahrzeug kontinuierlich zugenommen. Insbesondere im Teillastbereich macht der durch die Nebenaggregate verursachte Energiebedarf einen signifikanten Anteil am gesamten Kraftstoffverbrauch aus. Der optimierte Betrieb der Nebenaggregate hat deshalb einen hohen Stellenwert. Ein gutes Management kann den Verbrauch und die Emissionen senken und die Fahrsicherheit sowie den Insassenkomfort verbessern. Typische Nebenaggregate sind die in modernen Fahrzeugen vermehrt eingebauten Zuheizener. Man unterscheidet dabei verschiedene Arten: z.B. brennstoffbetriebene Zuheizener, elektrische sowie mechanisch betriebene Zuheizener. Diese werden während der Warmlaufphase des Fahrzeugs zur Erhöhung des Insassenkomforts (Heizwärme) und der Sicherheit (Enteisung der Scheiben) verwendet. Ein optimal betriebener Zuheizener erfüllt diese Anforderungen unter Minimierung des Energieaufwands.



Figur 2: Druckverteilung und Geschwindigkeitsverteilung über eine halbe Umdrehung des Zellenrades mit den vier Ein- und Auslasskanälen und den zwei Gastaschen (schematisch):

- a) verdeutlicht den Aufbau einer Schockwelle aus der Überlagerung von Druckwellen
- b) illustriert, dass bei verstimmt Drehzahl ein Teil der Abgase wieder in den Kanal 3 zurückfließt
- c) zeigt, wie der Druckausgleich in der Expansionstasche funktioniert

Inhalt der bisher durchgeführten Untersuchungen war die Entwicklung einer Regelung für einen Brennstoffzuheizener, mit dem Ziel, den Insassenkomfort bei möglichst geringem Kraftstoffverbrauch zu maximieren. In einem nächsten Schritt wurden die hergeleiteten Optimierungsmethoden auf weitere Zuheizersysteme angewendet. Insbesondere wurden optimale Regelgesetze für den Betrieb von elektrischen Zuheizern entwickelt. In simulierten Fahrzyklen konnte die Funktionsweise dieser Regelgesetze verifiziert und eine klare Verbesserung gegenüber dem aktuellen Stand der Technik aufgezeigt werden. Momentan wird ein Zuheizersystem basierend auf einer Wärmepumpe betrachtet und optimiert. Es kommen sowohl numerische als auch analytische Verfahren zum Einsatz. In einer Simulationsstudie wurden zudem verschiedene Zuheizersysteme bezüglich deren Effizienz analysiert und bewertet. Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojekts mit der University of Michigan (USA) wurde das dynamische Verhalten eines Polymer Electrolyte Membrane (PEM)-Brennstoffzellen-Systems mit dem Ziel einer späteren Optimierung untersucht und modelliert. Die optimale Regelung des transienten Verhaltens von Brennstoffzellen-Systemen ist insbesondere in der automobilen Anwendung aufgrund des stark instationären Betriebs von Bedeutung. Die Regelung dient im einfachsten Fall der Temperaturkontrolle des Systems, soll aber insbesondere auch der Energie-Optimierung des Warmlaufs dienen.

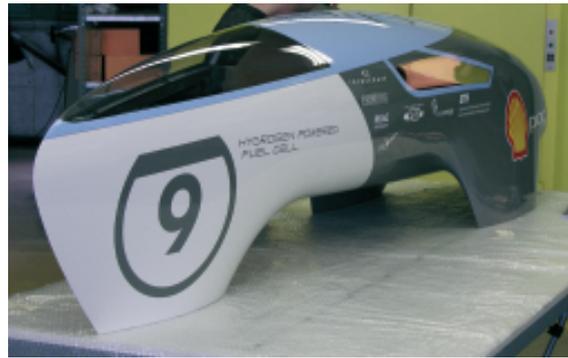
Das Projekt **PAC-Car** [3b] will das bisher sparsamste Automobil realisieren. Zu diesem Zweck hat das Institut für Mess- und Regeltechnik der ETH Zürich eine Forschungsgruppe zusammengestellt, die sich aus Forschern und Studenten der ETHZ und des Paul Scherrer Instituts sowie aus industriellen Partnern wie *RUAG Aerospace*, *Esoro AG* und *TribeCraft AG* zusammensetzt. Die Minimierung des Brennstoffverbrauchs umfasst die m Folgenden beschriebenen drei Hauptstossrichtungen:

a) Die Minimierung des **Fahrwiderstands** setzt an der aerodynamischen Komponente, dem Rollwiderstand, dem Hangabtrieb oder der Trägheitskraft an.

- Die Aerodynamik wird durch Windkanaltests (Fig. 2) und numerische Berechnungen mit Unterstützung von *RUAG Aerospace* untersucht. Fünf Untersuchungen wurden benötigt, um die geeignete Kombination von zwei Grundkonzepten zu finden.
- Im Rahmen des *Shell Eco-Marathon* beliefert die Firma *Michelin* alle Teilnehmergruppen mit schlauchlosen Radialpneus, welche einen sehr kleinen Rollwiderstand aufweisen. Diese werden auf Rädern montiert, die mit Präzisions-Kugellagern ausgestattet sind und deren Komposit-Material an der ETH neu entwickelt wurde.
- Die Gewichtsreduktion des Gefährts stellt ein zentrales Problem dar, denn das Gewicht bestimmt sowohl den Rollwiderstand, insbesondere in Kurven, als auch die Steigfähigkeit des Fahrzeugs.

b) Der **Antrieb** besteht aus einem Elektromotor, der aus einer Brennstoffzelle gespeisen wird. Die eingesetzten Antriebsmotoren sind von *Maxon Motors* speziell angefertigte Gleichstrommotoren, die mit ihrem Wirkungsgrad von 92% im Bereich der geforderten Antriebskraft unübertroffen sind. Die PEM-Brennstoffzellen sind mit einer am PSI entwickelten, integrierten Befeuchtung ausgestattet und weisen einen ausserordentlich hohen Wirkungsgrad von gegen 70% auf. Das Institut für Mess- und Regeltechnik entwirft und optimiert das Gesamtsystem des Brennstoffzellenantriebs (inklusive Leistungs- und Regelelektronik) im Hinblick auf Energieeffizienz, möglichst kleines Gewicht und höchste Zuverlässigkeit.

c) Da die Forschung gezeigt hat, dass das optimale Funktionieren eines **Fahrzeugsystems** nicht zwingend auf ein optimales Funktionieren der einzelnen Teile zu jedem Zeitpunkt zurückzuführen ist, musste die optimale Nutzungsstrategie des Fahrzeugs vorab definiert werden. Deshalb mussten unter anderem ein fahrzeugabhängiges Geschwindigkeitsprofil, ein Profil der Wettbe-



Figur 3: Windkanal-Modell des Pac-Car II

werbsstrecke samt Kurven und Höhenunterschieden, sowie ein mögliches Wetterszenario definiert werden. Das Fahrzeug soll im Mai 2005 der Weltöffentlichkeit vorgestellt werden.

Das Projekt **Brennstoffzellen-SAM** [4] der FH Biel nutzt das Fahrzeug SAM als Forschungsplattform für ein PEM-Brennstoffzellensystem. Im Jahr 2004 konnten alle Teilsysteme aufgebaut und erfolgreich getestet werden. Zum Jahreswechsel ist die Inbetriebnahme des Fahrzeugs teilweise erfolgt. Bislang konnten die technischen Ziele weitgehend erreicht werden. Der Abschluss des Projekts konnte aufgrund eines Schadens an der Leistungselektronik in diesem Jahr nicht wie vorgesehen erreicht werden. Es wird die vollständige Inbetriebnahme und Präsentation des Fahrzeugs im ersten Quartal 2005 angestrebt.

Die EMPA und die ETH Zürich in Zusammenarbeit mit der *Robert Bosch GmbH*, der *Volkswagen AG*, der *Corning GmbH* und der *Engelhard Technologies GmbH* entwickelten das **Clean Engine Vehicle** [5]. Ziel des Projekts war, mit einem auf monovalenten Erdgasbetrieb umgebauten Fahrzeug 30% niedrigere CO₂-Emissionen als mit einem vergleichbaren Benzinfahrzeug zu erreichen sowie die kalifornischen *SULEV*- und die europäischen *Euro-4*-Grenzwerte einzuhalten. Als Versuchsträger diente ein VW Polo mit einem 1.0 Liter-Benzinsaugmotor. Im Vergleich zu einem ähnlich motorisierten Benzinfahrzeug konnten die CO₂-Emissionen um 31% auf 109.5 g/km reduziert werden. Dies entspricht einem Benzinverbrauch von etwa 4.7 L Benzin/100 km. Es konnte auch gezeigt werden, dass deutlich tiefere Schadstoffemissionen verursacht werden, als dies mit herkömmlichen Fahrzeugen der Fall ist. Die grösste CO₂-Reduktion von 21.6% wurde durch den Umbau auf monovalenten Betrieb mit Erdgas – aufgrund des geringeren Kohlenstoffgehalts von Erdgas gegenüber Benzin – erzielt. Am

Motor wurden ausser den Umbauten (inkl. Anpassungen am Zündzeitpunkt) keine Änderungen vorgenommen. Gleichzeitig nahm die maximale Motorleistung um ca. 16% ab. Die anschliessende Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses führte zu einer weiteren CO₂-Reduktion von knapp 2.7% und die Motorleistung konnte gegenüber dem originalen Verdichtungsverhältnis um 6.5% erhöht werden. Die Turboaufladung sowie Anpassungen am Getriebe führten schliesslich zu einer nochmaligen CO₂-Reduktion von 3.4% und einer Leistungssteigerung gegenüber dem nicht aufgeladenen Erdgasmotor um 33.3%. Sie liegt damit 20% höher als beim 1.0 L Basismotor im Benzinbetrieb. Vergleicht man nun die CO₂-Emissionen des aufgeladenen Erdgasfahrzeuges mit denjenigen eines vergleichbar motorisierten Polos mit 1.4 L Benzinmotor, so liegen diese um 31% niedriger. Berücksichtigt man das Treibhausgaspotential der CH₄-Emissionen gemäss IPCC für den Zeitraum von 100 Jahren, so vermindert sich der CO₂-Vorteil auf 30%. Gleichzeitig zu der CO₂-Verminderung konnten die Schadstoffemissionen in beiden Fahrzyklen (NEFZ und FTP-75) unter die anvisierten Grenzwerte gesenkt werden.

In Zusammenarbeit mit der *Samson GmbH*, Biel entwickelt der Verein des Schweizer Gas- und Wasserfachs (SVGW) einen **SAM mit Erdgasantrieb** [6]. Erdgas als Treibstoff eliminiert bei vergleichbaren ökologischen Vorteilen die Schwächen des Batterie-Elektroantriebs (Reichweite, Batterielebensdauer und Kabinenbeheizung). Der Prototyp wird voraussichtlich im Frühjahr 2005 in Betrieb genommen, erprobt und optimiert.

Im Rahmen des Projekts **Pneumatische Rekuperation** [7] wurde ein hydropneumatischer Energiespeicher entwickelt, in einen Personenwagen integriert und die Zuverlässigkeit dieses Systems zur Rekuperation kinetischer Energie erprobt. Mit einem maximalen Speicherdruck von 300–400



Figur 4: Clean Engine Vehicle

bar kann gemäss ersten Berechnungen die hydropneumatische Rekuperation den Treibstoffverbrauch um ca. 10–15% gesenkt werden.

Nach dem Aufbau des **TOHYCO-Rider** Kleinbusses [8] in den Vorjahren, standen 2004 vor allem die Vorbereitungsarbeiten und die Durchführung des Pilotbetriebs zwischen dem Bahnhofplatz Luzern und dem Verkehrshaus im Mittelpunkt. Dazu waren wesentliche projektorganisatorische Arbeiten notwendig. Durch die völlige Umgestaltung des Busses standen aber auch diverse technische Arbeiten an. Die Inbetriebnahme der 24 SAM-Module stellte sich als sehr aufwendig heraus. Der eigentliche Pilotbetrieb zeigte auf, dass das Grundkonzept des Antriebs mit Superkapazitäten und der IPT Ladung zufriedenstellend arbeitet und ein sehr effizienter Betrieb möglich ist. Der Energiebedarf liegt beim 4000 kg schweren Bus bei 36 kWh/100 km beim Betrieb mit Super-Cap und bei 60 kWh/100 km bei reinem Batteriebetrieb. Diese Verbrauchsdifferenz ist mit dem wesentlich höheren Rekuperationswirkungsgrad der Superkondensatoren gegenüber demjenigen der Batterie begründet. Die Rekuperation ist gerade bei einem Stadtbus mit häufigem stop-and-go von grosser Bedeutung. Aber auch bei Hybridfahrzeugen könnte der Treibstoffverbrauch durch die Kombination Super-Cap/Batterie weiter abgesenkt werden. Das Antriebskonzept bewährte sich insgesamt gut, obwohl einige kleinere Pannen zu verzeichnen waren.

Das Projekt **E-Management-Integration** [10a] erlaubt die Vernetzung der energieliefernden, -wandelnden und -speichernden Elemente in einem mobilen oder stationären System (z.B. Kleinfahrzeug mit Elektrotraktion oder Inselanlage). Die wichtigsten Komponenten des Serien-Hybrid-Antriebs für Vorserien-Muskelkraftfahrzeuge konnten beschafft und in Bezug auf Energie-Effizienz, Geräusch, Gewicht sowie mechanische Integration optimiert werden. Ein Industriepartner aus der Schweiz will zusammen mit *Autork AG* den Serien-Hybrid-Antrieb für Muskelkraftfahrzeuge auf den Markt bringen.

Die Machbarkeitsstudie **MUPUM** [11] (Multiple Purpose Mobil) der FH Biel untersucht in Zusammenarbeit mit der Industrie Konzepte für ein Kommunalfahrzeug, das mit verschiedenen Modulen für unterschiedliche Einsätze bestückt werden kann (Schulbus, Kehrriichtfahrzeug, Strassenreinigung, Schneepflug, Feuerwehrfahrzeug, etc.). Ein solches Fahrzeug könnte so in den Kommunen die fixen Fahrzeugkosten senken. Als Antrieb eines solchen **MUPUM** steht im Moment ein Hybrid-System im Vordergrund. Die Studie wird im Jahr 2005 abgeschlossen.

Im Projekt **DownhillCoaster** [12] entwickelte die *Brusa AG* in Sennwald das Antriebssystem für ein neuartiges, individuell nutzbares, schienengebundenes Fahrzeug. Gegenwärtig wird ein Prototyp in Österreich erprobt.

Im Vordergrund des Projekts **Box-Energy** [13] von *e-mobile* stehen Batterie-Elektrofahrzeuge, Hybridfahrzeuge und in Zukunft Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Einer breiten Markteinführung dieser Fahrzeuge steht insbesondere der hohe Anschaffungspreis im Weg, was hauptsächlich auf die teuren Energiespeicher und -wandler sowie Antriebsstränge zurückzuführen ist. Eine Trendwende für eine erfolgreiche breite Markteinführung kann insbesondere durch eine teilweise Umlagerung der Anschaffungskosten auf die Betriebskosten erreicht werden. Erfahrungen mit der Batteriemiete und dem daraus resultierenden tieferen Kaufpreis im Rahmen des Grossversuchs in Mendrisio mit Leicht-Elektromobilen zeigen, dass eine solche Kostenumlegung eine starke Verkaufszunahme bewirken kann.

Basierend auf diesem vielversprechenden Ansatz bezweckt **BOX-ENERGY**, ein Mietsystem aufzubauen, das nicht nur die Batterien sondern den ganzen Antriebsstrang umfasst. Dabei wird den Kunden ermöglicht, die gemietete alternative Antriebstechnologie jederzeit zum Restwert zu erwerben. Dieser Restwert wird nach einem System ähnlich jenem von *Eurotax* festgelegt. Zudem soll eine Vollkasko-Versicherung für den alternativen Antriebsteil das finanzielle Risiko bei Sachschäden reduzieren. **BOX-ENERGY** stellt mit der Vermietung ausserdem sicher, dass die Weiterverwendung für andere Einsatzgebiete der Batterien und das Recycling beziehungsweise die korrekte Entsorgung der Batterien fachgerecht erfolgen. In einem Pilotprojekt soll zunächst mit Hybridfahrzeugen die Effizienz aller Prozesse getestet und die Akzeptanz der Kunden geprüft werden. Insbesondere gilt es, in einem räumlich begrenzten Gebiet und in einem auf einzelne Marken beschränkten Umfeld das Konzept zu testen und praktische Erfahrungen zu sammeln. Das Projekt soll während der ganzen Lebensdauer der Fahrzeuge wissenschaftlich begleitet werden. Bei einer erfolgreichen Umsetzung ist zu einem späteren Zeitpunkt auch die Anwendung des Mietsystems für Batterie-Elektrofahrzeuge und Brennstoffzellen-Fahrzeuge geplant. Die grundsätzliche und finanzielle Machbarkeit von **BOX-ENERGY** wurde anhand von Kalkulationsmodellen nachgewiesen. Diese lassen sich mittels Pilotprojekt verifizieren und optimieren. Zur Umsetzung des Pilotprojekts sowie des nachfolgenden, selbst tragenden Geschäftsideen sind

als nächster Schritt die entsprechenden Businesspläne auszuarbeiten.

Mit Unterstützung des BFE realisierte die *Société de navigation sur les lacs de Neuchâtel et Morat* das Pilotprojekt **Bulpe d'étraver M/S «Fribourg»** [24]. Dieses Projekt verbessert mit hydrodynamischen Massnahmen am Vordersteven die Wasserlage des Schiffes und mit motorischen Massnahmen den Wirkungsgrad des Dieselantriebs. Insgesamt konnten so 26 % Treibstoff eingespart werden.

Rallye21-Wirkung [22]: *ecos AG* in Basel, führte im Sommer 2004 die *Rallye21* durch. Bei diesem Publikumsanlass wurden u.a. energieeffiziente Fahrzeuge ausgestellt und es konnten effiziente und visionäre Fahrzeuge Probe gefahren werden. Daneben demonstrierten Prominente die positive Wirkung der *Eco-Drive*-Fahrweise. Insgesamt besuchten etwa 5000 Besucher den Anlass.

Die **Forschungsplattform CH** [21] ist ein Ausstellungsmodul in der Halle Strassenverkehr im Verkehrshaus der Schweiz in Luzern. Der erste Plattformbenutzer ist das Paul Scherrer Institut mit dem Brennstoffzellen-VW-Bora. Das Ausstellungsmodul beinhaltet vielfältige Exponate, welche die Funktionsweise von Brennstoffzellen erläutern und aufzeigen.

LEICHTBAU

Die *Carrosserie Hess AG* in Bellach SO entwickelt im Rahmen des Projekts **Swisstrolley 3** [9] einen neuen, energieeffizienten und leichten Trolleybus. Die Energieverbrauchsmessungen finden, wie die Lärmmessungen, zwischen Januar und März 2005 statt. Das projektierte Leer-Gewicht von 18'920 kg wurde beinahe erreicht, für das Fertigfahrzeug ist ein Leergewicht von 19'100 kg gewogen worden. Damit ist dieses Fahrzeug im Vergleich zu ähnlichen Fahrzeugen der Konkurrenz um 1400 kg leichter. Die Wirtschaftlichkeit kann mit einem vorläufig noch berechneten LCC-Fahrkilometer-Preis von CHF 0.69 als erfüllt gelten. Der Fahr-, der Einstieg- und der Sitzkomfort sowie das Interieur kommen bei den Fahrgästen und Betreibern sehr gut an. Das BAV hat das Fahrzeug nach allen Gesichtspunkten des Behindertengleichstellungsgesetzes sowie den dazugehörigen Empfehlungen abgenommen. Bis Ende März 2005 kann das Projekt voraussichtlich erfolgreich abgeschlossen werden.

Das Hauptziel des Projekts **Livio21** (*Lightweight Vision 21*) [14] ist die Entwicklung neuer Technologien (Konstruktionen, Materialien, Prozesse) zur Herstellung von leichtgewichtigen Modulen



Figur 5: Roll Out Swisstrolley 3, farblich auf seinen Einsatzort Luzern abgestimmt

für die Automobilindustrie. Im Jahr 2004 wurde mit dem Aufbau einer *fahrbaren Plattform* zur Erprobung dieser Leichtbau-Module und zur markenneutralen Demonstration bei den Automobilherstellern begonnen. Der Aufbau des Fahrzeugs besteht aus einem metallenen Rahmen (Space-frame ist erwiesenermassen eines der leichtesten Konzepte für eine Fahrzeugstruktur) und leichten Komposit-Modulen mit integrierten Funktionen. Ein solches Fahrzeug wird aufgrund des kleinen Querschnitts als leichtgewichtiger Kleinwagen mit guter Aerodynamik und einem effizienten Antriebssystem mit einem Minimum an Energie fahren können. Im Jahr 2004 wurde neben dem Aufbau dieser *fahrbaren Plattform* auch an Frontmodulen, Bodenmodulen, Dachmodulen und Kofferraummodulen gearbeitet. Es wurden auch Ideen aufgezeigt, wie mit einem leichten Kleinwagen die heutigen Sicherheitsanforderungen, welche bisher zu immer schwereren Fahrzeugen geführt haben, erfüllt werden können. Dabei werden sowohl die bei konventionellen Kleinwagen besonders kritische Fussgänger- als auch die Insassen-Sicherheit berücksichtigt. Mit Hilfe dieser Arbeiten, die in erster Linie am Frontmodul umgesetzt werden, soll aufgezeigt werden, wie die Fahrzeugmasse bei guter Sicherheit sowohl der Insassen als auch der Fussgänger gegenüber heutigen Kleinwagen verringert werden kann. Die beteiligten Projektpartner *Horlacher AG*, *Rieter Automotive Management AG*, *Georg Kaufmann AG*, *Quadrant*, *Festo*, Fachhochschule Aargau und Fachhochschule Beider Basel beabsichtigen im Jahr 2005 die *fahrbare Plattform* fertigzustellen sowie die Technologien zur Herstellung der Module weiterzuentwickeln.

Das Promotionsprojekt für Elektrozweiräder **New-Ride** [15] führte im Sommer 2004 eine telefonische Befragung von 20 E-Bike-FahrerInnen durch,

welche bereits seit längerem E-Bikes nutzen. Die zentralen Ergebnisse sind:

- Die Produkte sind langlebig: Die überwiegende Mehrheit der Befragten hat ihr Fahrzeug seit drei bis vier Jahren in Gebrauch
- Die Fahrzeuge werden intensiv genutzt: Die Mehrheit der Befragten hat ihr E-Bike mehrmals pro Woche in Gebrauch und legt durchschnittlich eine Distanz von 60 km pro Woche zurück
- Die KäuferInnen zeigen eine hohe Frustrationstoleranz: Trotz diversen anfänglichen technischen Problemen, der als zu gering beurteilten Reichweite der Batterie sowie des hohen Fahrzeuggewichts ist die Mehrheit der Befragten mit dem Produkt zufrieden und würde es auch wieder kaufen
- Frauen haben keineswegs grössere Schwierigkeiten im Umgang mit E-Bikes als Männer, eher das Gegenteil ist der Fall
- Ob die Befragten Personen mit ihrem Produkt zufrieden sind bzw. wie tolerant sie gegenüber *Kinderkrankheiten* sind, hängt entscheidend vom Engagement des Händlers ab. Wichtige Aspekte sind Kompetenz, rascher Service, Freundlichkeit sowie die gute Erreichbarkeit. Erst wenn genügend Händler in der Region vertreten sind, wird der Wunsch nach einem grösseren Sortiment der einzelnen Händler geäussert.

Das Projekt **Ultraleichtscooter** [10b] klärt die Machbarkeit (technisch, ökonomisch) eines ultraleichten, sehr energieeffizienten Scooters mit Elektrotraktion ab. Innerhalb dieser Studie sollen insbesondere Partner für die industrielle Umsetzung gewonnen werden. Folgende Resultate wurden bisher erzielt:

- Grob-Auslegung einer elektromagnetischen IPM-Antriebsmaschine (Internal Permanent Magnet)
- Vorentwicklung eines Batterie-Management-Systems für 10 Lithium-Zellen
- Design-Vorstudie

Dank Gesprächen mit einem potentiellen Industriepartner für das Fahrzeug ist die Grössenordnung des Industrialisierungs-Aufwands auf der Fahrzeugseite bekannt. Für die Umsetzung des Batterie-Management-Systems auf dem Markt konnte ein Schweizer Industriepartner gefunden werden.

Ein neuartiger **Wetterschutz** für das **Fahrrad** [16]. soll den Fahrradfahrer so beschaffen sein, dass der Fahrer in seiner sonstigen Kleidungs-wahl nicht eingeschränkt ist und der Schutz nach Gebrauch gut im Handgepäck verstaut werden kann. Diverse Funktionsmuster sind erstellt und



Figur 6: Velostation Stettbach / Dübendorf mit Platz für 29 Fahrräder

der Testsieger wird voraussichtlich im Jahr 2005 patentiert.

Im Projekt **Diebstahlsichere Velostation** [17] wurden verschiedene Varianten entwickelt. An der S-Bahn-Station Stettbach in Dübendorf wurde eine Station aufgestellt und in Betrieb genommen. Gegenüber herkömmlichen Veloparkings konnten die Kosten um einen Faktor ca. 3 gesenkt werden. Velostationen sind ein wichtiges Bindeglied in der kombinierten Mobilität.

Das Projekt **Citybike Swiss** [18] entwickelt ein automatisches Velovermietssystem. Ein solches Velovermietssystem kann in Zukunft den Zugang zur kombinierten Mobilität erleichtern.

Mit dem Projekt **e-rent** [23] in Wohlen BE wird ein Mietsservice für E-Scooter und E-Mobile erprobt. Trotz grossen Anstrengungen der Betreiber konnte der Kundenkreis nicht wesentlich erweitert werden. Das Projekt bestätigt auch die Erkenntnisse aus anderen Vorhaben, dass sich batteriebetriebene Elektrofahrzeuge schlecht für einen Mietsservice eignen. Die Gründe hierzu sind der Memory-Effekt bei der selten vollständig entladenen Batterie, die Verfügbarkeit von voll aufgeladenen Fahrzeugen sowie die Berührungängste neuer Nutzer.

AKKUMULATOREN UND SUPERKONDENSATOREN

Im Projekt **Integrated micro-supercapacitors** [25] wird ein mikrostrukturierter Doppelschichtkondensator (DSK) entwickelt, der für die Energie- und Leistungsversorgung einer Mikrobrennstoffzelle dient. Der Kondensator soll sowohl bei der Startphase der Brennstoffzelle Energie liefern als auch im Betrieb Leistungsspitzen abdecken. Der DSK soll bei einem Volumen von max. 3 cm³ eine Energie von 2 J und eine Leistung von 5 W liefern. In einer ersten Projektphase wurde hierzu RuO₂ hergestellt, zu einer nicht strukturierten Elektrode verarbeitet und getestet. Die Elektrode zeigt eine spezifische Kapazität von 400 F/g im flüssigen Elektrolyten.

Mit finanzieller Unterstützung des BFE klärt die **MES DEA S.A.** aus Stabio TI die Machbarkeit einer **Niedertemperatur-Zebra Batterie** [26] ab. Die herkömmliche Zebra-Batterie weist eine Betriebstemperatur von 270 – 350°C auf. Trotz nur minimalen thermischen Verlusten ist diese Temperatur für viele Anwendungen nachteilig resp. verunmöglicht sogar den Einsatz der Batterie. Da das System bezüglich Lebensdauer und Energiedichte über hervorragende Eigenschaften verfügt, versucht **MES DEA**, die Betriebstemperatur durch den Einsatz geeigneter Lösungsmittel wesentlich abzusenken. Erste Versuche im Labor bestätigten die theoretische Machbarkeit – für deren Anwendung bedarf es aber noch wesentlicher Forschungs- und Entwicklungsarbeit.

Das Projekt **OPAL** [27] optimierte das Batterie-Management für Bleiakkumulatoren. Dabei wurde ein breites Massnahmenpaket erarbeitet, wie die Lebensdauer der Batterie (Ladezyklen) wesentlich verlängert werden kann. Bisherige Erkenntnisse wurden bestätigt, aber es stellte sich auch ein überraschender neuer Ansatz heraus: Die Anzahl der Ladezyklen kann erheblich vergrössert werden, wenn eine mechanische Abstützung parallel zu den Elektroden-Platten der Batterieseitenwände eine Kompression bewirkt.

Nationale Zusammenarbeit

Das Programm **Verkehr / Akkumulatoren** koordiniert und vernetzt die Energieforschungsaspekte im Themengebiet. Die Zusammenarbeit mit dem ETH-Bereich, den Fachhochschulen, der Industrie und den Verbänden ist gut etabliert und es findet ein reger Erfahrungs- und Informationsaustausch statt. An einer inzwischen etablierten, jährlich stattfindenden Forschungstagung des BFE

werden diese Koordination, die Vernetzung und der Informationsaustausch speziell gefördert. Im Berichtsjahr fand diese Tagung mit etwa 100 Teilnehmern an der ETH in Zürich statt. Ein Tagungsband mit sämtlichen Präsentationen ist verfügbar und kann bei der Programmleitung bezogen werden.

Internationale Zusammenarbeit

Die Schweiz wirkt seit dessen Gründung aktiv im IEA-Programm **Hybrid and Electric Vehicle Technologies and Programs** (HEV) [28] mit. Im Berichtsjahr ist sie zusätzlich dem Programm **Advanced Motor Fuels** (AMF) beigetreten. Die Aktivitäten zeigen, dass das Brennstoffzellen-Fahrzeug in den nächsten zehn Jahren noch nicht genügend ausgereift sein wird, um auf dem Massenmarkt erfolgreich eingeführt werden zu können. Diese Zeit wird das Hybridfahrzeug überbrücken, einerseits in der Konstellation mit interner Hybridisierung, wie bei den Modellen *Toyota Prius II* oder *Honda Insight* und *IMA* oder mit dem

neuen *plug-in-Hybridfahrzeug*. Das reine Elektrofahrzeug besetzt mehr und mehr Nischen wie die der kommerziellen Kleintransporter oder Kommunalfahrzeuge (für Krankentransporte, Müllabfuhr etc.). Im Segment individueller Personenverkehr spielen nur mehr Nahverkehrsfahrzeuge eine Rolle, in Europa insbesondere Zweiradfahrzeuge (E-Scooter, E-Bike). Die weltweite Entwicklung lässt für die Schweiz Optionen bei der Komponentenentwicklung offen. Ihre Vorreiterrolle bei der Markteinführung energieeffizienter Fahrzeuge hat die Schweiz an andere Länder (v.a. Frankreich, Italien, Kalifornien, Japan) abgegeben.

Ausblick 2005

Erdgas als Treibstoff, synthetische und biogene Treibstoffe resp. Zusätze, hybride Antriebsstränge, verbesserte Systeme bei den Diesel-, wie auch Ottomotoren, verbesserte Getriebetechnologien und modularer Leichtbau versprechen weitere Effizienzgewinne und Einsparpotential bei CO₂. Zur Entschärfung der CO₂-Problematik bei gleichzeitig global wachsender Mobilität braucht es

drastische Fortschritte, einerseits bei den Fahrzeugflotten, andererseits bei der Anwendung energieeffizienter Nahverkehrsmittel. Die Projekte **NewRide** (seit 2001), **Pac-Car II** (im Jahr 2005), moderne (Hybrid-)Fahrzeuge der Autoindustrie sowie *Bahn2000* zeigen auf, was mit moderner Technologie, verbunden mit einem vernünftigen Mobilitätsverhalten möglich ist.

Liste der Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

- [1] U. Schwegler, (ursschwegler@bluewin.ch), e'mobile, Fischen: **CleanerDrive** (JB), <http://www.e-mobile.ch>.
- [2] G. Moreni (gianni.moreni@rapp.ch), ARGE Rapp Trans, Zürich, Interface, Luzern: **Finanzielle Anreize für effiziente Fahrzeuge**, (JB), <http://www.rapp.ch>.
- [3] L. Guzzella, C. Onder, (guzzella@imrt.mavt.ethz.ch), ETH-Zürich: **a) PALOS II Optimale Antriebssysteme für Leichtfahrzeuge** (JB) • **b) Pac-Car** (JB), <http://www.ethz.ch>.
- [4] M. Hoeckel, (michael.hoeckel@hti-bern.bfh.ch), FH Bern/Biel: **Brennstoffzellen-SAM** (JB), <http://www.hta-bi.bfh.ch/E/Laboratories/FuelCell>.
- [5] Ch. Bach, (christian.bach@empa.ch), EMPA Dübendorf: **Clean Engine Vehicle** (SB), <http://www.empa.ch/abt137>.
- [6] M. Seifert, (m.seifert@svgw.ch), Verein des Schweizerischen Gas und Wasserfaches, Zürich: **Erdgas SAM** (JB), <http://www.svgw.ch/>.
- [7] F. Sbarro, (sbarro@freesurf.ch), A.C.A. Ateliers d'Etudes, Grandson: **Pneumatische Rekuperation** (JB).
- [8] V. Härrli (v.v.h@bluewin.ch), HTA Zentralschweiz, Horw: **Tohyco-Kleinbus mit Super-Caps** (JB), <http://www.hta.fhz.ch/projekte/samtohyco>.
- [9] A. Naef / H.-J. Gisler, (info@hess-ag.ch), Carrosserie Hess, Bellach: **Swisstrolley3** (JB), <http://www.hess-ag.ch>.
- [10] A. Fuchs, (andreas.fuchs@hti.bfh.ch), FH Bern: **a) Energiemanagementsystem** (JB) • **b) Ultraleichtscooter** (JB), <http://www.hta-be.bfh.ch/>.
- [11] J.-F. Urwyler (jean-francois.urwyler@hti.bfh.ch), FH Biel: **MUPUM** (JB), <http://www.hti.bfh.ch>
- [12] a: Mathoy, (arno.mathoy@brusa.biz), Brusa AG, Sennwald: **DownhillCoaster**, (SB), <http://www.brusa.biz>
- [13] M. Piffaretti, (marco.piffaretti@protoscar.ch), e'mobile, Bern: **Box-Energy** (SB) <http://www.emobile.ch>
- [14] M. Horlacher, (thomas.efler@bluewin.ch), Horlacher Möhlin: **Livio21** (JB), <http://www.horlacher.com>.
- [15] U. Haefeli, (haefeli@interface.ch), Interface, Luzern: **NewRide** (JB), <http://www.interface-politikstudien.ch>.
- [16] M. Schütz / D. Irany, (martin.schuetz@tribecraft.ch), Tribecraft, Zürich: **Wetterschutz Fahrrad** (JB), <http://www.tribecraft.ch>.
- [17] P. Rust, (rust-partner@bluewin.ch), Progress Parking AG Buchs: **Diebstahlsichere Velostation** (SB)
- [18] S. Maissen (s.maissen@bro.ch), Rent a Bike, Therwil: **Citybike SWISS** (JB); <http://www.rentabike.ch>
- [19] St. Lienin / B. Kasemir, (stephan.lienin@sustainserv.com), sustainsurv, Zürich: **Novatlantis-Pilotregion Basel, Innovative Fahrzeugflotte** (JB), <http://www.novatlantis.ch>
- [20] U. Aeschbacher, (huber.demoex@datacomm.ch), DemoEx GmbH, Ebikon: **Demo-Gerät CO₂-Effekt** (SB).
- [21] S. Maurer (maurer.sybille@vhs.ch) Verkehrshaus der Schweiz, Luzern: **Forschungsplattform CH** (SB), <http://www.verkehrshaus.ch>.
- [22] S. Gäumann (susanne.gaeumann@ecos.ch) ecos, Basel: **Rallye21 Wirkung** (SB), <http://www.ecos.ch>.
- [23] R. Kiener, (r.kiener@gmx.ch) Gemeinde Wohlen: **e-rent** (JB), <http://www.mobilem.ch>, <http://www.buchmich.ch>.
- [24] D. Wicht, (info@navig.ch) Société de navigation sur les lacs de Neuchâtel et Morat SA, Neuchâtel: **Bulpe d'étraver M/S «Fribourg»**, (SB), <http://www.navig.ch>.
- [25] R. Kötz (ruediger.koetz@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Villigen: **Integrated micro-supercapacitors** (JB), <http://www.psi.ch>.
- [26] C. Dustmann, (cdustmann@mes-dea.ch) MES-DEA, Stabio: **Niedertemperatur-Zebra Batterie** (JB) <http://www.cebi.com>.
- [27] K. Meier-Engel (karl.meier@hti-bi.bfh.ch) FH Biel: **a) OPAL** (JB) • **b) ALBOCCA** (JB), <http://www.hta-bi.bfh.ch>.
- [28] S. Kleindienst Muntwyler (muntwyler@solarcenter.ch) Solarcenter Muntwyler, Zollikofen: **IEA Implementing Agreement HEV** (JB).

Referenzen

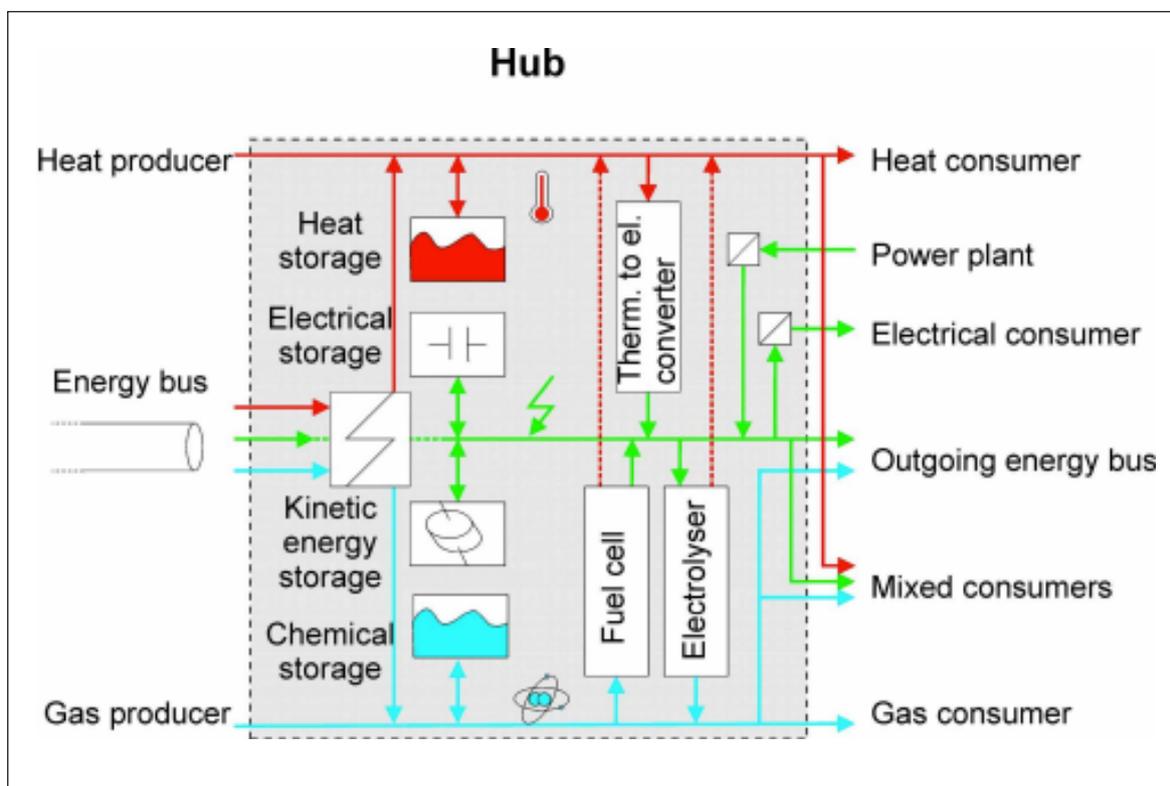
- [29] M. Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch) BFE, Bern: **Programme Verkehr und Akkumulatoren/ Supercaps 2004 – 2007**, <http://www.energie-schweiz.ch/bfe/de/verkehr/forschung/>.
- [30] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007**, download unter: <http://www.energie-schweiz.ch/internet/03095/index.html?lang=de>.

ELEKTRIZITÄT

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Roland Brüniger

roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch



Modell eines «Energy-Hubs» (Quelle: ETH Zürich)

Im Projekt *Vision of Future Energy Networks* wird ein nachhaltiges, dezentral organisiertes und auf regenerativen Energieträgern basiertes Verteilsystemen vollständig neu entwickelt. Mit dem sogenannten *Energy-Hub* werden verschiedene Energieträger den Verbrauchern bedarfsorientiert zur Verfügung gestellt.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Der Anteil der **Elektrizität** am Gesamtenergieverbrauch der Schweiz beträgt etwa 20 Prozent. Sie hat nicht nur als eigentlicher Energieträger eine herausragende Bedeutung, sondern spielt auch für die effiziente Nutzung der anderen Energieträger eine wichtige Rolle. Ein sorgfältiger und effizienter Umgang mit der Elektrizität ist deshalb wichtig. Mit dem BFE-Forschungsprogramm *Elektrizität* [41] sollen Grundlagen für einen optimierten Einsatz der Elektrizität von der Erzeugung bis zur effizienten Verwendung geschaffen werden. In Anlehnung an die Zielsetzung von *Energie-Schweiz* [37], den Stromverbrauchszuwachs von 2000 bis 2010 auf max. 5% zu begrenzen, liegen die Schwerpunkte bei der rationellen *Elektrizitätsnutzung*, beim effizienten *Elektrizitätstransport* und bei der *Elektrizitätsspeicherung*.

Der Bereich **Elektrizitätsnutzung** ist in mehrere Teilbereiche unterteilt. Beim Themengebiet der *Informations- und Kommunikationstechnik* handelt es sich weitgehend um einen globalen Massenmarkt. Die Umsetzung gewonnener Erkenntnisse bedingt damit internationale Zusammenarbeit, um die gewünschte Breitenwirkung zu erzielen. Ein Schwerpunkt bestand deshalb darin, die über die Jahre hinweg in spezifischen Projekten gewonnenen Erkenntnisse konzentriert über die Landesgrenzen hinweg bekannt zu machen, und damit im Rahmen von Kooperationen die internationale Umsetzung zu forcieren. Dies beinhaltete insbesondere die Themen: Server-Schalten, Stromverbrauch von Settop-Boxen und Effizienz von USV-Anlagen. Auch im *Geräte*-Bereich bestand die Zielsetzung darin, bei ausgewählten Geräten die Grundlagen für eine Effizienzsteigerung zu erarbeiten.

Obwohl das geschätzte Einsparpotential im Bereich der *Antriebe und elektrischen Motoren* auf gegen 7'000 GWh geschätzt wird, ist dessen Erschliessung aufgrund des breiten Einsatzgebiets

und des heterogenen Vertriebsmarktes nicht einfach. Im Vordergrund der Aktivitäten standen deshalb klar abgrenzbare und identifizierbare Bereiche. Ein Hauptziel bestand darin, mit griffigen technischen Grundlagen die Vertriebsbranche dazu zu bringen, sich für eine Marktanteilerhöhung von hocheffizienten Motoren (eff1) zu verpflichten. Ergänzende Untersuchungen der *Lifecycle-Costs* sollen Einkäufer sensibilisieren und überzeugen, dass der Einsatz effizienter Motoren auch wirtschaftlich ist. Im Bereich *Druckluft* bestand die Zielsetzung 2004 darin, mit konkreten Industrieprojekten den Aufbau des Kompetenzzentrums *Druckluft* sicherzustellen. Ergänzend sollten die Vorbereitungsarbeiten und die konkrete Verpflichtung der einschlägigen Industrie zum Transfer des in Deutschland laufende Programms *Druckluft-effizient* abgeschlossen werden, damit die Kampagne im Jahr 2005 gestartet werden kann.

Im Bereich **Elektrizitätstransport und -speicherung** bestand die Zielsetzung 2004 einerseits darin, die ermutigenden Ergebnisse eines neuartigen Druckluftspeicherkonzepts in einem Folgeprojekt zu konkretisieren und andererseits ein grosses, gesamtschweizerisches Projekt vorzubereiten, in dem das Zusammenspiel zwischen dezentralen Erzeugungsanlagen und dem Niederspannungsnetz in einem Testnetz 1:1 untersucht wird. Aufgrund der aktuellen Wirtschaftslage und der eher bescheidenen technischen Fortschritte bei der Hochtemperatursupraleitung hält sich die Schweizer Industrie mit diesbezüglichen Aktivitäten etwas zurück. Umso wichtiger ist es, dass eine minimale Kontinuität im Projekt- und Informationsbereich sichergestellt wird. Dies war damit auch die Zielsetzung 2004, was einerseits mit der unterbruchsfreien Teilnahme am entsprechenden IEA-Implementing-Agreement und andererseits mit einem intensiven Austausch mit der Industrie angegangen wurde.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

ELEKTRIZITÄSTRANSPORT UND -SPEICHERUNG

Eine sichere Stromversorgung stellt das Rückgrat der gesamten Wirtschaft dar. Neue technische Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung der Elektrizitätsverteilung sind deshalb unter Berücksichtigung der regulatorischen Rahmenbedingungen

sorgfältig zu prüfen und die Verfügbarkeit darf nicht in Mitleidenschaft gezogen werden.

Das Ziel des Projekts *Vision of Future Energy Networks* [1] besteht in der Erarbeitung von Szenarien und Randbedingungen für einen Wandel des bestehenden Elektroenergiesystems hin zu einem nachhaltigen, dezentral organisierten und

auf regenerativen Energieträgern basierten System. Zentrales Element ist der Energy Hub, eine Art Energiedrehscheibe, in der Energie umgewandelt, gespeichert und verteilt werden kann. Die Systemanalyse sowie entsprechende Optimierungswerkzeuge wurden im Berichtsjahr entwickelt. Die offenen Fragen der teilweise notwendigen, aber fehlenden Technologien sowie die Entwicklung eines kombinierten Lastflussberechnungsmoduls und –optimierungsmoduls wird das Hauptthema im Jahr 2005 sein.

Im Rahmen der **Machbarkeitsstudie «Dezentrale Erzeugungsanlagen in Niederspannungsnetzen»** [2a] wurde untersucht, in welchem Netz, mit welchen Partnern und mit welchem finanziellen Engagement das in einem abgeschlossenen Projekt gewonnene, theoretische Wissen in der Praxis überprüft und vertieft werden kann. Das Interesse der einschlägigen Industrie kann als hoch eingestuft werden, ein Testnetz wurde identifiziert und es ist absehbar, dass ein entsprechendes Pilotprojekt gestartet werden kann.

Die kürzlich gestarteten Projekte **Steuerbare Speicher zur Optimierung des Energieflusses in Niederspannungsnetzen mit DEA** [3a] und **Effizienzsteigerung im Verteilnetz durch neue Netzkonfigurationen** [3b] haben in unterschiedlicher Stossrichtung beide zum Ziel, die Energieverteilung im Niederspannungsnetz zu optimieren.

Die beiden Projekte **Einsatz von Druckluftspeichersystemen** [4a] und **Techn. Grundlagen der Druckluftspeicherung und deren Einsatz als Ersatz für Bleibatterien** [4b] haben aufgezeigt, dass ein innovatives und praktisch isothermes Druckluftspeicherkonzept neue Speichermöglichkeiten anbietet. Im anschliessend gestarteten Projekt **Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzepts BOP-B** [5] geht es neben der Wirkungsgradoptimierung des Motor-Generators vor allem darum, den praktischen Funktionsnachweis des Wärmetauschers im Wandler zu erbringen.

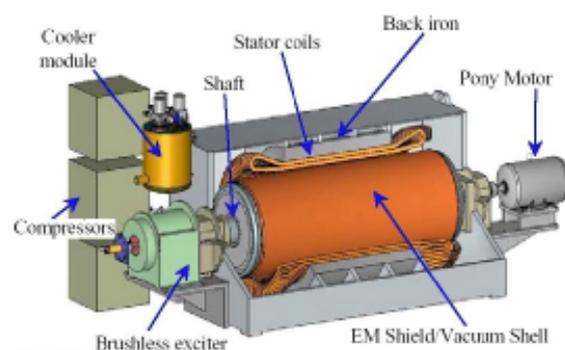
Mit dem interdisziplinären Projekt **Wechselstromkorrosion an Pipelines** [6] wurden Modelle entwickelt und experimentell geprüft, um den Einfluss von elektrischen Energieübertragungsleitungen auf die Korrosionsbildung an Erdgasleitungen zu berechnen.

Resultate weiterer Forschungsprojekte der spezifischen Institute der beiden ETH und der Fachhochschule Biel sowie Projekte, die vom **Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft** (PSEL) finanziert werden, sind im Internet [38] zu finden.

HOCHTEMPERATURSUPRALEITUNG (HTSL)

Mit der Teilnahme am **Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector** [7] der Internationalen Energie Agentur (IEA) wird sichergestellt, dass die Schweiz die Übersicht über die weltweite HTSL-Spitzenforschung beibehält. Bei beiden internationalen Informationstreffen 2004 stand das HTSL-Kabel im Vordergrund. Die umfangreiche Dokumentation dieser IEA-Treffen wurde an alle in der Schweiz in der Supraleitung tätigen Forschungsinstitute und Industrien im Rahmen des alljährlich stattfindenden Status-Seminars weitergeleitet. Eine Weiterführung dieses Agreements für weitere 5 Jahre wird vorbereitet.

Obwohl die Abklärungen im Projekt **Marktpotential von supraleitenden Strombegrenzern** grundsätzlich positive Ergebnisse brachten, hat sich **ABB** bis anhin leider nicht entschlossen, die entsprechenden Arbeiten fortzusetzen und einen Prototypen zu entwickeln. Umso erfreulicher ist es, dass **Alstom** mit dem Projekt **Hochtemperatur-Supraleitung in elektrischen Maschinen, insbesondere Generatoren** [8] (Fig. 1) untersucht, wo die Vor- und Nachteile einer grossen elektrischen Maschine mit HTSL-Wicklung liegen. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass die Leiterkosten noch substantiell gesenkt werden müssen und die Marktchancen als kritisch eingestuft werden.



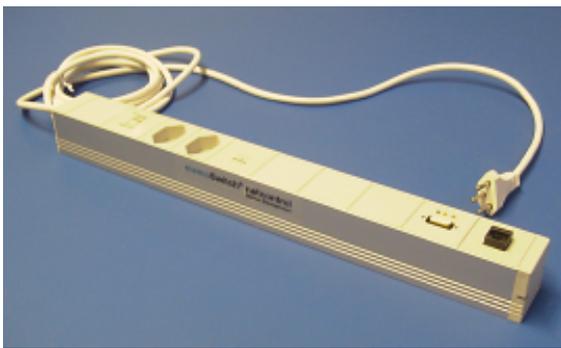
Figur 1: Rotierender HTSL-8MVAR-Phasenschieber von American Superconductor (Quelle: AMSC, USA)

Das Projekt **National Center of Competence in Research MaNEP (Materials with Novel Electronic Properties)** des schweizerischen Nationalfonds befindet sich im vierten Jahr. Es befassen sich dabei 8 Institute und Industrien in theoretischen oder experimentellen Arbeiten mit HTSL-Supraleitern.

ENERGIE UND INFORMATIONSTECHNIK

Der Anteil der Informationstechnik am Stromverbrauch in der Schweiz liegt heute bei etwa 10%, wobei die Zuwachsraten die höchsten von allen Stromanwendungen sind. Weltweit werden viele Studien für einen rationelleren Elektrizitätseinsatz insbesondere bei Büro- und Unterhaltungselektronikgeräten durchgeführt und Massnahmen zur Umsetzung der Einsparpotentiale ergriffen. Das **Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik** [9] beobachtet diese Aktivitäten und versucht, den rasch ändernden Wissensstand zu verfolgen. Im Internet wird ferner eine Wissensdatenbank über diese Thematik gepflegt.

EDV-Server werden in kleineren und mittleren Betrieben praktisch nie ausgeschaltet, obwohl eine Nutzung in den Nachtstunden oder an den Wochenenden in der Regel nicht gegeben ist. Studienergebnisse belegen, dass mit einem bedarfsgerechten Ein- und Ausschalten von Servern in der Schweiz jährlich etwa 90 GWh und in der EU sogar 2'000 GWh eingespart werden könnten. Mit Hilfe einer externen, autonomen Steckdosenleiste mit integriertem Webserver (Fig. 2) kann ein automatisiertes und ordnungsgemässes Ein- und Ausschalten von EDV-Servern programmiert werden. Im Projekt **Energieeffizientes Servermanagement im praktischen Betrieb** [10] wurde die Funktionstauglichkeit dieser Schalteleiste in unterschiedlichen Umgebungen eingehend geprüft und benutzerfreundlich optimiert. Nächstens wird eine Kleinserie auf den Markt gebracht.



Figur 2: Erprobte Steckdosenleiste mit standardisierten Abmessungen zum Ein- und Ausschalten von Servern (Quelle: EMT AG, Ermatingen)

Im Projekt **Energieoptimaler Einsatz der ACPI-Funktionalität** [11a] wurden in einem Praxistest die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von energiesparenden Ruhezuständen durch die Nutzung integrierter Funktionen bei Servern des unteren Preissegmentes geprüft. Die Implementierung

der Ruhezustände basiert auf der so genannten *ACPI-Spezifikation (Advanced Configuration and Power Interface)*. Am weitesten fortgeschritten ist diese beim Betriebssystem Windows Server 2003. Unter Linux stehen die Ruhezustände noch nicht vollumfänglich zur Verfügung. Bei vielen Anwendungen, speziell beim Einsatz des Servers als Datei- und Webserver, entstehen durch die Nutzung dieser Ruhezustände keinerlei betriebliche Nachteile und bei Verwendung des tiefstmöglichen Ruhezustandes nachts und an Wochenenden kann der Energiebedarf des Servers halbiert werden. Für die Anwender wurden die Resultate in einem zweiseitigen Merkblatt zusammengefasst.

Die EU schätzt den Stromverbrauch für so genannte Settop-Boxen (eine Art Gateway beim Endbenutzer für das digitale Fernsehen) für 2006 auf etwa 23'000 GWh und das dazugehörige Einsparpotential durch Verbesserung der Energieeffizienz wird mit 15'000 GWh veranschlagt. Zur Umsetzung des Einsparpotentials hat die EU mit der einschlägigen Industrie eine freiwillige Vereinbarung, einen so genannten *Code of Conduct (CoC)* abgeschlossen und auch die IEA unternimmt entsprechende Bemühungen. Mit dem Projekt **Energieeffizienz bei Settop Boxen** [11b] wurde die Thematik für die Schweiz aufgearbeitet und festgestellt, dass bis in etwa 10 Jahren bis zu 3 Mio. Settop-Boxen installiert sein werden, die im besten Fall gegen 300 GWh und im ungünstigsten Fall gegen 500 GWh Strom verbrauchen. Um das mutmassliche Einsparpotential zu aktivieren, werden in Abstimmung mit den internationalen Aktivitäten und gemeinsam mit der *Energieagentur Elektrogeräte eae* im Projekt **Workshop Energieeffizienz bei Settop Boxen** [11c] die schweizerischen Akteure auf die Thematik und die internationalen Bemühungen aufmerksam gemacht und wenn möglich dazu gebracht, sich dem europäischen CoC anzuschliessen.

Grundsätzlich verursacht die Infrastruktur eines *Smarthomes* einen erhöhten Strombedarf. Aus der Sicht des effizienten Umgangs mit Ressourcen kann dieser Mehrverbrauch nicht befürwortet werden. Wenn Komfort- und Sicherheitsbedürfnisse aber trotzdem mit vermehrter Technik befriedigt werden sollen, dann muss versucht werden, dies möglichst energieeffizient umzusetzen. Im Projekt **Smarthome und Energieeffizienz** [11d] wurde ein im Bau stehendes Einfamilienhaus begleitet und versucht, spezifische Energieaspekte einzubringen. Messungen im Jahr 2005 sollen die entsprechenden Auswirkungen aufzeigen. Ebenfalls um die Effizienzsteigerung im Heimbereich geht es im Projekt **Home Automation System** [12], bei welchem effiziente



Figur 3: Unterzeichnungsfeier (von links nach rechts W. Stalder, Präsident SAP, W. Steinmann, BFE-Direktor, P. Mazenauer, Präsident SAP-Sektion 37 (Quelle: BFE, Bern)

und modulartige Komponenten für eine adaptive Steuerung entwickelt werden. Das damit verbundene, theoretische Einsparpotential wird auf über 100 GWh/Jahr geschätzt.

Die Ergebnisse des Projekts **Effiziente Stromversorgung mittels Power over Ethernet (PoE)** [11e] zeigten auf, dass eine mit Ethernet verbundene, zentrale Stromversorgung im kleinen Leistungsbereich (bis etwa 8 Watt) effizienter arbeitet als eine dezentrale Stromversorgung.

Mit dem Projekt **Energieeffizienz von USV-Anlagen** [2b] wurden die früher erarbeiteten Grundlagen über die Auslegung, Qualität und Energieeffizienz mit den Standby-Verlusten ergänzt und für eine europäische Umsetzung aufbereitet. Dank den vorhandenen englischen Versionen und intensiven Kontakten zur EU-Kommission konnte erreicht werden, dass auf Basis der schweizerischen Arbeiten voraussichtlich ein europäischer *Code of Conduct* für grössere USV-Anlagen und ein Energielabel für kleinere USV-Anlagen zur EU-weiten Anwendung erarbeitet wird. Zudem werden die Unterlagen von einem amerikanischen Projektteam verwendet, welches im Auftrag der California Energy Commission die Verbesserung der Energieeffizienz für USV-Anlagen in Rechenzentren zum Ziel hat. Auch die *Environmental Protection Agency (EPA)* wird voraussichtlich die Ergebnisse der schweizerischen Arbeiten als Grundlage für ein *Energy Star* Label benutzen.

ANTRIEBE / ELEKTRISCHE MOTOREN

Im Projekt **Industrievereinbarung Energieeffizienz von Motoren** [2c] konnten mit der einschlägigen Industrie alle Grundlagen, Marktanalysen sowie die Melde- und Auswertemechanismen

für eine freiwillige Vereinbarung zur Förderung des eff1-Motors erarbeitet werden. Auf dieser Grundlage hat die herstellende und vertreibende Motorenindustrie über deren Verband, den *Schweizer Automatik Pool (SAP)* mit dem BFE am 17. Dezember 2004 eine freiwillige Vereinbarung zur sukzessiven Steigerung des Marktanteils von effizienten Motoren im Bereich 2- und 4-polig von 1,1 – 90 kW unterzeichnet (Fig. 3).

Im internationalen SAVE-Projekt **Promot: Ein Werkzeug zur Entscheidungsfindung für Motorenbetreiber** [14] wurde im Berichtsjahr entschieden, durch den Schweizer Partner ein bestehendes Pumpen- und VSD-Modul (Variable Speed Drive) aus den USA zu übernehmen, und programmtechnisch als eigenständiges Modul in das Promot-Werkzeug zu integrieren.

Mit dem neu gestarteten Projekt **Beschaffung von Motoren unter Vollkostenbetrachtung** [2d] sollen mit Musterausschreibungen und einfachen Hilfsmitteln für die Auswertung von Motorenofferten die Gesamtlebenskosten mitberücksichtigt werden, da damit aufgrund des hohen Stromkostenanteils die Wirtschaftlichkeit von hocheffizienten Motoren nachgewiesen werden kann.

Basierend auf dem Projekt **Prototyp Energiesparmotor** [15], in welchem Alternativen im Bereich Wicklungsverfahren und Stator konstruktion erfolgreich geprüft wurden, konnte als Folgeaktivität im Berichtsjahr ein erstes **Funktionsmuster eines Integral-Sparmotors im Leistungsbe- reich < 1 kW** [16] (Fig. 4) konstruiert werden. Der gemessene Wirkungsgrad ergab mit dem neuartigen 250W Energiesparmotor (Gleichstrommotor) mit integrierter Steuerung einen maximalen Wert von gegen 80%. Kostenmässig wird darauf geachtet, dass die Investitionskosten vergleichbar zum Normmotor/Frequenzumformer bleiben.



Figur 4: Funktionsmuster des Integral-Sparmotors (Quelle: Circle Motor AG, Gümligen)

Im Projekt **Integraldrive II: Integrierter Motor-Umformer mit bedarfsorientierter Energieaufnahme** [17] wird ein Prototyp eines Low-Cost-Antriebs auf Asynchronbasis im Leistungsbereich 0.1 bis 12 kW mit integrierter Energiedrosselung entwickelt. Das Prinzip beruht auf einem voll integrierten, gepulsten Läuferwiderstand, dank dem gegenüber einem unregelmäßigen Antrieb im Pumpen und Lüfterbereich pro Jahr hochgerechnet auf die Schweiz gegen 220 GWh eingespart werden könnten. Im Berichtsjahr wurde der Prototyp optimiert und ausgiebig ausgetestet.

Für zwei Leistungsklassen wurden im Projekt **Hocheffiziente getriebelose Antriebe** [18] Antriebssysteme für Anwendungen mit tiefen Drehzahlen entwickelt. Diese Systeme bestehen jeweils aus einem Umrichter und einer mit Permanentmagneten ausgerüsteten Synchronmaschine, womit die Systeme sowohl für motorischen wie auch generatorischen Betrieb geeignet sind. Für die Systeme unterschiedlicher Leistung wurden Prototypen entwickelt und geprüft. Beim System mit hoher Leistung (1200 kW, 20 rpm) wurde bei Nennleistung ein Gesamt-Wirkungsgrad von 93.1% erreicht, beim System mit kleiner Leistung (3 kW, 60 rpm) betrug der Gesamt-Wirkungsgrad 85%. Damit weisen diese entwickelten Systeme bei Nennleistung ca. 4% weniger Verluste auf als die konventionellen Antriebssysteme mit mechanischem Getriebe.

Rund 750 GWh Elektrizität werden in der Schweiz durch etwa 150'000 Druckluftanlagen verbraucht, was 1,5% des nationalen Stromverbrauchs ausmacht. Da das Einsparpotential auf ca. 300 GWh geschätzt wird, laufen mehrere Aktivitäten zu dessen Erschliessung. Mit den **Vorarbeiten zum Start der Kampagne Druckluft effizient Schweiz und begleitende Arbeiten zum Aufbau eines Druckluftkompetenzzentrums** [19a] wurden einerseits in einem Chemieunternehmen Analysen in den Druckluftnetzen vorgenommen. Andererseits wurden unter Einbezug der Industrie die erforderlichen Grundlagen für eine schweizerische Druckluft-Kampagne geschaffen. Die vorgesehenen Aktionen sind definiert. Gestartet wurde zudem die **Umsetzung eines mehrsprachigen internetgestützten Benchmarkings von Druckluftanlagen** [19b]. Damit lässt sich auf einfache Art eine Erstanalyse von Druckluftsystemen durchführen und Schwachstellen identifizieren. Im Projekt **Optimierung der Steuerluftversorgung bei der Valorec Services AG** [20] wurden die Daten der bestehenden Anlagen, die jährlich etwa 3.1 GWh verbrauchen, aufgenommen und ein Messkonzept entwickelt. Durch Miteinbezug des Kompetenzzentrums in verschiede-

ne Druckluftaktivitäten wurde der **Aufbau des Druckluft Kompetenzzentrums an der HTA Luzern, Phase 1** [21] unterstützt.

GERÄTE / DIVERSES

Nachdem im Projekt **Energieeffiziente Hotel-Minibar** [13] ein technisches Einsparpotential von etwa 15 GWh ermittelt wurde und mit verschiedenen Handlungsalternativen auch wirtschaftliche Ansätze aufgezeigt werden konnten, wurde zur Umsetzung ein **Merkblatt Effiziente Hotel-Minibar** erarbeitet. Weil die entsprechende Industrie zu wenig Interesse zeigte, konnte leider die Entwicklung eines alternativen Minibar-Systems nicht angegangen werden.

Im Projekt **Branchenvereinbarung bei Wasserdispensern** [11f] wurden formelle Kontakte zu den beiden marktführenden Vertreibern etabliert. Gemeinsam mit der Branche sollen nun die Grundlagen für eine Vereinbarung geschaffen werden, um das geschätzte, technische Einsparpotential von über 20 GWh für 2010 umzusetzen. Im Vordergrund stehen für 2005 die Entwicklung einer nachvollziehbaren Messmethodik auf der Basis des *Energy Star Programms* und die Ermittlung von realistischen Zielwerten.

In der Schweiz waren Ende der 90er Jahre etwa 16'000 gekühlte Getränke- und Warenautomaten in Betrieb, für welche ein Energieverbrauch von etwa 50 GWh pro Jahr geschätzt wird. Um das vorhandene, substantielle Effizienzpotential umzusetzen, wurden im Projekt **Merkblatt zur optimalen Energienutzung bei Kaltgetränke- und gekühlten Warenautomaten** [11g] Tipps zum Unterhalt und zum Aufstellort zusammengestellt. Als Zielpublikum werden Betreiber von Automaten und Vermieter der Standplätze anvisiert.

In der Schweiz werden mit der Einführung des neuen Zivilschutzkonzepts rund 3000 unterirdische Anlagen existieren. Diese Anlagen werden wegen der möglichen Schimmelbildung und der Gefahr von Radon oder Methan mit frischer Luft gespült und mechanisch entfeuchtet, was einen jährlichen, geschätzten Energiebedarf von 30 GWh verursacht. Mit dem Projekt **Effizientes Entfeuchten von abgeschlossenen Räumen** [22] soll dank Ausnützung der Differenzen des Feuchtigkeitsgehalts zwischen Anlageinnerem und Umgebung die energieintensive mechanische Entfeuchtung optimiert werden, was ein Einsparpotential von ca. 10 GWh ergeben dürfte. Im Berichtsjahr wurde vor allem an einer optimalen Sensorik gearbeitet und 2005 sind Messungen an mehreren Objekten vorgesehen.

Ab dem 1.10.2006 darf Klärschlamm nicht mehr landwirtschaftlich verwertet, sondern muss umweltverträglich verbrannt werden. Als Vorstufe zur thermischen Entsorgung stehen die mechanische Entwässerung und Trocknung des Klärschlammes im Vordergrund. Da damit in verschiedenen Kläranlagen Klärschlammaufbereitungsanlagen geplant werden und dabei den Energieaspekten oft keine grosse Bedeutung beigemessen wird, werden im Projekt **Energetische Optimierung der Klärschlammaufbereitung** [23] mehrere Verfahren ausgemessen, damit diese Erkenntnisse anschliessend im Programm *EnergieSchweiz* umgesetzt werden können. Nachdem die verschiedenen Verfahren dargestellt und energetisch verglichen worden sind, erfolgen im Jahr 2005 entsprechende Messungen. Ebenfalls zur abschliessenden Umsetzung durch *EnergieSchweiz* werden im Projekt **Messprogramm energetisch optimierter Beleuchtungsverfahren auf ARA** [24] die energetischen Grundlagen mehrerer Beleuchtungsverfahren analysiert. Nachdem 2004 die Beschreibung der Verfahren und das Messkonzept entwickelt wurden, erfolgen 2005 die Messungen.

Auf gegen 1'000 GWh wird in der Schweiz der Stromverbrauch aller im Detailhandel installierten Kühlmöbel geschätzt, mit einem mutmasslichen Einsparpotential von mindestens 10%. Mit dem Projekt **Effizienzklassen für Kühlmöbel im Detailhandel** [25] wurden Grundlagen für eine wirksame Effizienzsteigerung in diesem Bereich geschaffen. Dabei konnte festgestellt werden, dass international viele Aktivitäten laufen, jedoch noch längere Zeit bis zur greifbaren Umsetzung benötigen. Deshalb wurden Vorschläge für eine raschere Umsetzung in der Schweiz entwickelt. Die gemeinsam mit dem Bundesamt für Gesundheit (BAG) durchgeführte Studie **Elektromagnetisches Feld von Energiesparlampen** [26] zeigte, dass sich diese Strahlung im Rahmen der Abstrahlung herkömmlicher Glühlampen bewegt. Die Resultate geben keinen Hinweis darauf, dass bei der Benützung von Energiesparlampen eine gesundheitliche Beeinträchtigung zu befürchten wäre. Energiesparlampen leisten im Gegenteil einen wichtigen Beitrag zum Energiesparen, könnten doch durch einen konsequenten Einsatz an der Stelle von Glüh- und Halogenlampen pro Jahr rund 1'800 GWh eingespart werden.

Nationale Zusammenarbeit

In allen Programm-Schwerpunkten treffen sich im Rahmen der etablierten **Trendwatching-Gruppen** Vertreter der einschlägigen Industrie, Hochschulen und anderer Forschungsstätten. Diese anerkannten Zusammenkünfte von Fachleuten bewähren sich als regelmässig stattfindende, nationale Informations- und Diskussionsforen. Die vor einem Jahr etablierte Gruppe im USV-Bereich beschäftigt sich mit der Ausarbeitung von Grundlagen für eine europäische USV-Vereinbarung (*Code of Conducts*). Die *Working Group WGeff* konnte gemeinsam mit der Branche die Grundlagen für die Motoren-Vereinbarung erfolgreich erarbeiten.

Eine gute Zusammenarbeit konnte mit der Industrie in verschiedenen Bereichen (z.B. Aufzüge, Wasserdispenser, Settop-Boxen, ADSL-Modem) etabliert werden. Die Konferenz *Effiziente Elektroantriebe* wird vom Programm gemeinsam mit *Swissmem* und der *Energieagentur der Wirtschaft (EnaW)* vorbereitet. Ein enger Kontakt wird auch mit dem Programm *EnergieSchweiz* gepflegt.

Generell wird der Einbindung von **Fachhochschulen** grosse Bedeutung beigemessen, und deren Engagement konnte in mehreren Projekten gewonnen werden. So laufen Projekte mit

der Fachhochschule Biel im Verteilnetzbereich, mit der Fachhochschule Wallis im Motoren-/ Leistungselektronikbereich, und bei der Hochschule für Technik und Architektur Luzern sowie der Fachhochschule beider Basel sind Projekte im Bereich Druckluft angesiedelt. Das etablierte **Kompetenzzentrum Energie- und Informationstechnik** an der ETH Zürich leistet weiterhin einen wichtigen Beitrag zur nationalen (wie auch internationalen) Zusammenarbeit und gilt als anerkannte Institution in diesem Fachbereich.

Durch die gemeinsame Finanzierung von Forschungsprojekten konnten bestehende Kontakte zu weiteren **Förderinstitutionen** wie dem *Energiesparfonds des EWZ*, dem *Stromsparfonds Baselstadt*, der *Commission Recherche, développement, prospective de la Chambre romande d'énergie électrique (RDP / CREE)*, dem *Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL)* und der KTI gepflegt werden.

In mehreren Projekten wird ein enger Kontakt zu den schweizerischen **Energieagenturen EnaW**, eae und *S.A.F.E* [39] gepflegt. In den Projekten werden wenn möglich **Branchenverbände** (z.B. *SAP*, *SWISSMEM*) eingebunden.

Internationale Zusammenarbeit

In allen Schwerpunktsbereichen konnten die bestehenden, internationalen Kontakte ausgebaut und vertieft werden. Dies erfolgt einerseits bei der direkten Zusammenarbeit in Projekten und andererseits durch die Teilnahme an internationalen Konferenzen und Workshops.

Die Schweiz hat formelles Interesse bezüglich dem in Vorbereitung stehenden IEA-Implementing Agreement **Electricity Networks R&D** bekundet. Zudem wurde das Projekt **Einsatz von Druckluftspeichersystemen** mit dem europäischen **INVESTIRE**-Projekt (ENK5-CT-2000-20336) abgestimmt.

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. Eine neue Zusammenarbeit ist zudem im Rahmen des **6. EU-Rahmenprogramms** im Gange. Das **Superconducting European Network, SCENET II** (GTC1-2001-43047) umfasst dank den neuen osteuropäischen Staaten mehr als 80 verschiedene europäische Gruppen (Nodes) aus Hochschulen und Industrie, die sich mit Supraleitung befassen. Die Schweiz ist mit 2 Standorten vertreten und ist Mitglied des **SCENET Steering Committee**.

An der **International Conference on Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings, IECEB'04** [40] in Frankfurt wurden durch die Programmleitung zwei Präsentationen über das Thema USV-Industrie-Vereinbarung und das Thema Server-Schalten vorgetragen. Dies führte einerseits zu Gesprächen mit dem bei Intel verantwortlichen Entwicklungsingenieur für die Energieversorgung und andererseits konnte im die EU dazu gewonnen werden, Verbrauchszielwerte zu definieren und diese als Grundlage für eine europäische Vereinbarung mit der Industrie zu nutzen. Die Schweiz nimmt dabei eine Führungsrolle ein. Als Folgeaktivität wurde die Programmleitung ins europäische Forschungszentrum in Ispra eingeladen, und die auf der Basis von mehreren Projekten erarbeiteten USV-Unterlagen konnten mehreren Gremien präsentiert werden.

Interesse an den Ergebnissen für USV-Anlagen zeigt auch die **California Energy Commission (CEC)** und das **Lawrence Berkley National Laboratory** welche an einem Energieeffizienz Pro-

jekt für USV-Anlagen in Rechenzentren arbeiten. Der **EPA**, die für das Label *Energy Star* zuständig ist, wurden die englischen USV-Dokumente ebenfalls zugestellt.

Die schweizerischen Arbeiten im Gebiet der **Informations- und Kommunikationstechnik** sind international abgestützt und koordiniert. So werden unter anderem Kontakte mit der **europäischen Kommission**, der **EPA** und dem **LBL (Lawrence Berkeley National Laboratory)** in den USA sowie mit der französischen **ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)** gepflegt. Im Mai wurde die Programmleitung zudem zu einem **IEA Experten-Workshop** in Paris zum Thema *Energieverbrauch von Settop-Boxen* eingeladen. Auch die in der Schweiz laufenden Folgeaktivitäten in diesem Bereich stossen bei der IEA auf Interesse. Durch die engen Kontakte zur EU besteht ein guter Informationsfluss bezüglich der europäischen Aktivitäten in den Bereichen Settop-Boxen, und externe Netzgeräte. Die Programmleitung wurde zu den entsprechenden CoC-Meetings eingeladen.

Durch die Arbeiten im europäischen **Motor Challenge Programm** konnten gute internationale Beziehungen etabliert werden. So wird eine Zusammenarbeit mit der **Deutschen Energieagentur DENA** erwogen, und das **Europäische Kupferinstitut** hat sogar ein schweizerisches Projekt im Motorenbereich mitunterstützt. Mit der Beauftragung des deutschen Fraunhofer Instituts soll das dort vorhandene Fachwissen, welches im deutschen Programm *druckluft-effizient* aufgebaut worden ist, in die Schweiz transferiert werden. Die gute, europäische Zusammenarbeit im Motorenbereich drückt sich auch dadurch aus, dass die Programmleitung ins *Programme Committee* der internationalen Konferenz **Energy Efficiency in Motor Driven Systems EEMODS'05** berufen wurde. Zudem ist die Schweiz aktiver Partner im europäischen **SAVE**-Projekt **Promot: Ein Werkzeug zur Entscheidungsfindung von Motorenbetreibern**.

Schliesslich wird durch die Schweizer Teilnahme am **Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy sectors using Hydrogen** [27] (siehe P+D-Projekte) der Anschluss an die internationale Forschergemeinde unterstützt.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

ELEKTRIZITÄTSTRANSPORT UND -SPEICHERUNG

Im internationalen Projekt **Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy sectors using Hydrogen (RES: Reversible Energy Storage System)** [27] 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. Die Steuerung ist vom Schweizer Partner entwickelt worden; leider kommen jedoch die Arbeiten im Gesamtprojekt nicht im geplanten Ausmass vorwärts.

Die vermehrt dezentral eingesetzten, verteilten Erzeugereinheiten können den Ausbau und den Betrieb der Verteilnetze auf den verschiedenen Spannungsebenen der Verteilnetze erheblich beeinflussen. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie **Dezentrale Erzeugungsanlagen in Niederspannungsnetzen** [28a] wurden die organisatorischen, technischen und finanziellen Rahmenbedingungen für die Realisierung eines Projektes zur Installation eines realen Pilot- und Demonstrationsnetzes im 400V Niederspannungsnetz entwickelt und weitgehend festgelegt.

ENERGIE UND INFORMATIONSTECHNIK

Zur breitenwirksamen Umsetzung von vorhandenen Erkenntnissen wurden im Rahmen des Projekts **Merkblätter im IT-Bereich** [29] die mehrsprachigen Merkblätter *IT-Beschaffung*, *Energieverwaltung in Windows®* und *Server schalten* erstellt.

Internationale Untersuchungen bestätigen, dass der Stromverbrauchsanteil für die Kühlung von IT-Räumen von heute etwa 50% auf unter ca. 30% für bestehende und auf unter ca. 20% des Gesamtstromverbrauchs für neue IT-Räume gesenkt werden könnte. Anhand eines Beispiels wurde im Projekt **Energieeffizientes Kühlen von IT-Räumen** [30a] eine Planungs- und Informationsdokumentation inklusiv Checkliste ausgearbeitet. Ebenfalls wurden die Ergebnisse in einem entsprechenden Merkblatt zusammengefasst. Damit sollen den HLK-Planern und den IT-Betreibern die relevanten Parameter und Zusammenhänge für eine energetisch effiziente Kühlung von IT-Räumen aufgezeigt werden. Eine bekannte Massnahme zur Senkung des Stromverbrauchs in IT-Räumen liegt in der Erhöhung der mittleren Raumtemperatur von 22 auf 26 Grad. Ein Mitte der 90-

iger Jahren erarbeitetes **Merkblatt des BFE: 26 Grad in EDV-Räumen, eine Raumtemperatur ohne Risiko** [30b] wurde aktualisiert.

ANTRIEBE / ELEKTRISCHE MOTOREN

Das Projekt **Unterstützungsaktivitäten zum Motor Challenge Programm Schweiz** [31] konzentrierte sich im Berichtsjahr auf zwei Hauptaktivitäten: Einerseits die Erneuerung der Homepage und andererseits die Vorbereitung einer Workshop-Fachtagung, welche als zentrales Element der Motivierung von Betriebsfachleuten dienen soll. Mit *SWISSMEM* konnte ein bestens ausgewiesener und engagierter Träger der Veranstaltung gewonnen werden, als Referenten wurden Betriebs- und Beratungsfachleute aus der Schweiz und Deutschland gefunden. Die Durchführung der Tagung wurde durch die *Energieagentur der Wirtschaft (EnAW)* unterstützt. Das Pilotprojekt mit *Novartis Pharma AG* wurde erfolgreich abgeschlossen. Für drei Gebäude der *Novartis-Werke* wurden haustechnische Anlagen (Pumpen, Ventilatoren, Fig. 5) auf Effizienzpotenziale überprüft. Auch hier zeigten sich Überdimensionierungen und zu hohe Förderleistungen und es konnten effiziente Sanierungsmassnahmen zusammengestellt werden.



Figur 5: Netzwasserpumpen bei Novartis
(Quelle: Semafor AG, Basel)

Alle energierelevanten Prozesse und Verfahrenstechniken in Kehrrechtverwertungsanlagen wurden im Projekt **Elektrizitätseffizienz in Kehrrechtverwertungsanlagen** [28b] auf Optimierungspotentiale analysiert. Für die vertiefte Analyse einzelner Prozesse wurden Messreihen durchgeführt. Bei der KVA Turgi können jährlich zwischen 1,8 GWh bis 2,3 GWh eingespart werden. Dies entspricht bei einem Eigenverbrauch der KVA Turgi von 17 GWh einer jährlichen Einsparung von 11 % bis 14 %. Die Hochrechnung auf alle thermischen Kehrrechtverwertungsanlagen der Schweiz ergab ein Einsparpotenzial von jährlich ca. 40 GWh, was dem Verbrauch von rund 11'000 Haushalten entspricht.

Mit dem Projekt **Energieeffizienz in Abwasserreinigungsanlagen (ARA)** [32] steht ein *mithörendes Leitsystem* zur Verfügung, mit dem ohne Eingriffe in die bestehenden Prozesse präzise Messungen zur Energieoptimierung durchgeführt werden können. Das vorhandene Wissen im Bereich Kehrrechtverbrennungsanlagen (KVA) wurde in einer **Anleitung mit Checkliste zur Energieoptimierung von KVAs** [33] zusammengefasst.

Im branchenspezifischen Pilotprojekt **Energieeinsparung am Fallbeispiel Christoph Burckhardt AG** [34] sind substantielle Effizienzsteigerungspotentiale identifiziert worden. Der grösste Anteil wurde dabei im Bereich Druckluft ermittelt.

GERÄTE / DIVERSES

Im Projekt **Energieoptimierte Textillufttechnikanlage** [35] konnte nachgewiesen werden, dass der elektrische Energieverbrauch dank einer Direktbefeuchtung um bis zu 45% reduziert werden kann. Der Wasserverbrauch lässt sich um bis zu 66% senken. Würden weltweit alle geeigneten Anlagen mit einem Direktbefeuchtungssystem ausgerüstet und die Luftmengen entsprechend reduziert, so liesse sich ein Energieeinsparpotential von 1'500 GWh/a umsetzen.

Mit dem Pilotprojekt **Retrolux als Energiespar-konzept** [36] wird der Nachweis anhand mehrerer Installationen erbracht, dass mit dem Einsatz eines T5-Adapters stromsparende T5-Fluoreszenz-lampen anstelle konventionellen T12/T8 Leuchten verwendet werden können und damit ein grosses Einsparpotential umgesetzt werden kann.

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Im Januar 2004 wurde das **Konzept Elektrizität** für die Periode 04 – 07 der Eidg. Energieforschungskommission CORE präsentiert und anschliessend vom Bundesamt für Energie genehmigt.

Im Bereich **Elektrizitätstransport und -speicherung** können die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich dem *Speichermedium Druckluft* als positiv eingestuft werden und es ist zu hoffen, dass die initiierten Folgearbeiten die bisherigen Ergebnisse erhärten. Leider konnte der Feldversuch in einem ausgewählten Netz bezüglich dezentraler Energieerzeugungsanlagen nicht wie erwartet gestartet werden. Die Partnersuche gestaltete sich aufwendiger als geplant. Es ist zu hoffen, dass 2005 definitiv mit dem redimensionierten Projekt gestartet werden kann.

Leider hat die Industrie nach dem Abschluss der Studie **Strombegrenzer mit Hochtemperatursupraleitungs-Material** ein geplantes Folgeprojekt nicht in Angriff genommen. Auch der Versuch, weitere Industrien zu entsprechenden Projekten im HTSL-Gebiet zu motivieren, war bis anhin nicht mit Erfolg gekrönt. Die Programmleitung wird aber weiterhin einen engen Kontakt mit der Industrie pflegen und versuchen, Erfolg

versprechende Projekte zu lancieren. Die erfolgreiche Wissensvermittlung innerhalb der Schweiz im Rahmen des HTSL-Statusseminars unterstützt diese Bemühungen und wird deshalb auch zukünftig aufrechterhalten.

Die internationale Verankerung der Aktivitäten im Bereich der **Informations- und Kommunikationstechnik** konnte 2004 wie vorgesehen verstärkt werden. Insbesondere war das grosse Interesse der EU an den Arbeitsergebnissen im Bereich USV erfreulich und die Idee eines *Code of Conduct* wurde nicht nur aufgenommen, sondern die Schweizer Arbeiten werden auch als Grundlage verwendet. Bei den Settop-Boxen ist die internationale Kooperation mit der EU und der IEA hervorragend. Das Interesse von *Intel* für die Arbeitsergebnisse des Server-Schaltens ist vielversprechend. Leider dürfte eine entsprechende Umsetzung noch einige Zeit beanspruchen, da es nicht einfach ist, im Server-Bereich mess- und nachvollziehbare Effizienzvorgaben zu formulieren. Dieser Thematik soll 2005 nachgegangen werden.

Im Bereich **Antriebe / elektrische Motoren** wurden in mehreren Branchen Demonstrationsprojekte beendet. Obwohl es schwierig war,

kompetente Redner für die Fachtagung *Effiziente Elektroantriebe* zu gewinnen, und deshalb das Datum auf Januar 2005 verschoben werden musste, war es sehr erfreulich, dass neben der *EnAW* auch *SWISSMEM* als Partner gewonnen werden konnte. Die vertiefte Vorbereitung zur Übertragung der deutschen Kampagne *Druckluft effizient*

in die Schweiz hat viele Zusagen der Branche gebracht. Es ist zu hoffen, dass die Kampagne im 2005 effektiv gestartet werden kann und das versprochene Engagement der Industrie erfüllt wird. Der Aufbau des schweizerischen Druckluft-Kompetenzzentrums verzögerte sich aus personellen Gründen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden

- [1] K. Fröhlich, G. Andersson (froehlich@eeh.ee.ethz.ch), ETH ZÜRICH, Zürich: **Vision of Future Energy Networks** (JB)
- [2] G. Schnyder, (gilbert.schnyder@sing.ch), SCHNYDER INGENIEURE AG, Hünenberg: **a) Dezentrale Energieerzeugungsanlagen in Niederspannungsnetzen (Machbarkeitsstudie)** (SB) ♦ **b) Energieeffizienz von USV-Anlagen** (SB) ♦ **c) Industrievereinbarung Energieeffizienz von Motoren** (SB) ♦ **d) Beschaffung von Motoren unter Vollkostenbeachtung** (JB)
- [3] M. Höckel, (hkm1@bfh.ch), BERNER FACHHOCHSCHULE - HTI, BIEL: **a) Steuerbare Speicher zur Optimierung des Energieflusses in Niederspannungsnetzen mit DEA** (JB) ♦ **b) Effizienzsteigerung im Verteilnetz durch neue Netzkonfigurationen** (JB)
- [4] I. Cyphelly (cyphelly@ran.es), CYPHELLY & CO., Les Brenets: **a) Einsatz von Druckluftspeichersystemen** (SB) ♦ **b) Techn. Grundlagen der Druckluftspeicherung und deren Einsatz als Ersatz für Bleibatterien** (SB)
- [5] P. Brückmann (brueckmannelektronik@bluewin.ch), BRÜCKMANN ELEKTRONIK, Davos: **Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzepts BOP-B** (JB)
- [6] F. Stalder, M. Büchler, R. Bräunlich, (sgk@sgk.ch), SCHWEIZ. GESELLSCHAFT FÜR KORROSIONSSCHUTZ (SGK), Zürich: **Wechselstromkorrosion an Pipelines** (SB)
- [7] R. Flükiger, (rene.flukiger@physics.unige.ch), UNIVERSITÉ DE GENÈVE: **Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector** (JB)
- [8] R. Joho (reinhard.joho@power.alstom.com), ALSTOM (SCHWEIZ) AG, Birr: **Hochtemperatur-Supraleitung in elektrischen Maschinen, insbesondere Generatoren** (JB)
- [9] B. Aebischer, (bernard.aebischer@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, ETH-Zürich: **Kompetenzzentrum Energie und Informatik** (JB) www.biblioite.ethz.ch
- [10] B. Sauter, (beat.sauter@emt.ch), ENERGY MANAGEMENT TEAM AG, Ermatingen: **Energieeffizientes Servermanagement im praktischen Betrieb** (SB)
- [11] A. Huser, (alouis.huser@encontrol.ch), ENCONTROL GMBH, Niederrohrdorf: **a) Energieoptimaler Einsatz der ACPI-Funktionalität** (SB) ♦ **b) Grundlagen zur Energieeffizienz von Set-Top-Boxen** (SB) ♦ **c) Workshop Energieeffizienz bei Set-Top-Boxen** (JB) ♦ **d) Smarthome und Energieeffizienz** (JB) ♦ **e) Effiziente Stromversorgung mittels Power over Ethernet (PoE)** (SB) ♦ **f) Branchenvereinbarung bei Wasserdispensern** (JB) ♦ **g) Merkblatt zur optimalen Energienutzung bei Kaltgetränke- und gekühlten Warenautomaten** (Merkblatt)
- [12] T. Schumann, (info@adhoco.com), ADHOCO AG, Winterthur: **Home Automation System** (JB)
- [13] J. Nipkow, (juergnipkow@swissonline.ch), ARENA ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIE-ALTERNATIVEN, Zürich: **Energieeffiziente Hotel-Minibar** (SB, Merkblatt)
- [14] R. Tanner, (tanner@semafor.ch), SEMAFOR INFORMATIK & ENERGIE AG, Basel: **Promot: Ein Werkzeug zur Entscheidungsfindung für Motorenbetreiber** (JB)
- [15] J. Weingartner, (j.weingartner@baechli.com), BÄCHLI AG, Kriens: **Prototyp Energie-Sparmotor** (JB)
- [16] J. Lindegger (info@circlemotor.ch), CIRCLE MOTOR AG, Gümligen: **Funktionsmuster eines Integral-Sparmotors im Leistungsbereich < 1 kW** (JB)
- [17] A. Stoev, A. Dittrich (a.stoev@idsag.ch), IDS AG, Zürich: **Integraldrive II: Integrierter Motor-Umformer mit bedarfsorientierter Energieaufnahme** (JB)
- [18] R. Niederer, (niederer@vivattec.ch), VIVATEC GMBH, Basel, GEBRÜDER MEIER AG, Regensdorf, HOCHSCHULE WALLIS, Sion: **Hocheffizienter getriebeloser Antrieb** (SB)
- [19] P. Radgen, (peter.radgen@isi.fhg.de), FRAUNHOFER INSTITUT , SYSTEMTECHNIK UND INNOVATIONSFORSCHUNG, Karlsruhe: **a) Vorarbeiten zum Start der Kampagne Druckluft effizient Schweiz und begleitende Arbeiten zum Aufbau eines Druckluftkompetenzzentrums** (JB) ♦ **b) Umsetzung eines mehrsprachigen internetgestützten Benchmarkings von Druckluftanlagen** (JB)
- [20] R. Dott, (r.dott@fhbb.ch), FHBB-IFE, Muttenz: **Optimierung der Steuerluftversorgung bei der Valorec Services AG** (JB)

- [21] B. Stadelmann, (bstadelmann@hta.fhz.ch), HTA LUZERN, *Horw: Aufbau des Druckluft Kompetenzzentrums an der HTA Luzern, Phase 1* (JB)
- [22] A. Weitnauer, (adrian.weitnauer@weitnauer-messtechnik.ch), WEITNAUER MESSTECHNIK, *Näfels: Effizientes Entfeuchten von abgeschlossenen Räumen* (JB)
- [23] H. Vetter, (winterthur@holingerag.ch), HOLINGER AG, *Winterthur: Energetische Optimierung der Klärschlammabbe- reitung* (JB)
- [24] B. Kobel, S. Kempf, (stefan.kempf@rysering.ch), RYSER INGENIEURE AG, *Bern: Messprogramm energetisch optimierter Belebungsverfahren auf ARA* (JB)
- [25] A. Frölich, (andreas.frölich@mgb.ch), MIGROS GENOSSENSCHAFTS BUND, *Zürich: Effizienzklassen für Kühlmöbel im Detailhandel* (SB)
- [26] G. Dürrenberger, (gregor@mobile-research.ethz.ch), ETHZ, *Zürich: EMF von Energiesparlampen* (SB, Merkblatt)

Liste der P+D-Projekte

- [27] A. Stoev, (a.stoev@idsag.ch), IDS AG, *Zürich: Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy sectors using Hydrogen* (JB)
- [28] G. Schnyder, (gilbert.schnyder@sing.ch), SCHNYDER INGENIEURE AG, *Hünenberg: a) Dezentrale Erzeugungsanlagen in Niederspannungsnetzen* (SB) ♦ *b) Elektrizitätseffizienz in Kehrlichtverwertungsanlagen* (SB)
- [29] A. Huser, (alouis.huser@encontrol.ch), ENCONTROL GMBH, *Niederrohrdorf: Merkblätter im IT-Bereich*
- [30] A. Altenburger, (adrian.altenburger@amstein-walthert.ch), AMSTEIN + WALTHERT AG, *Zürich: a) Energieeffizientes Küh- len von IT-Räumen* (SB) ♦ *b) Aktualisierung des BFE-Merkblatts «26 Grad in EDV-Räumen, eine Raumtemperatur ohne Risiko»*
- [31] J. Nipkow, (juergnipkow@swissonline.ch), ARENA ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIE-ALTERNATIVEN, *Zürich: Ergänzende Unterstützungsaktivitäten zum Motor Challenge Programme in der Schweiz* (JB) www.motorchallenge.ch
- [32] R. Büniger, (buenger1@bluewin.ch), BÜNGER CONSULTING, *Grenchen: Energieeffizienz in Abwasserreinigungsanla- gen (ARA)* (SB)
- [33] S.Egli, (s.u.a.eng@bluewin.ch), S&A ENGINEERING AG, *Schaffhausen: Anleitung mit Checkliste zur Energieoptimie- rung von KVAs* (SB)
- [34] R. Tanner, (tanner@semafor.ch), SEMAFOR INFORMATIK & ENERGIE AG, *Basel: Energieeinsparung am Fallbeispiel Chris- toph Burckhardt AG* (SB)
- [35] U. Kupferschmid, (uku@luwa.ch), LUWA TEXTILLUFTTECHNIK, *Uster: Energieoptimierte Textillufttechnikanlage* (SB)
- [36] R. Kälin, (ruedi.kaelin@erka.ch), ERKA SOURCING AG, *Schönenwerd: Retrolux als Energiesparkonzept* (SB)

Referenzen

- [37] *Homepage von EnergieSchweiz und dem BFE* www.energie-schweiz.ch
- [38] *Internetseite des Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL)* (dort sind auch Links zu nationalen Forschungsstätten zu finden) www.psel.ch
- [39] *Homepage von Energieagenturen* www.energieagentur.ch und www.energie-agentur.ch und www.eae-geraete.ch
- [40] R. Brüniger: *Reisebericht: International Conference on Improving energy efficiency in Commercial Buildings, IECEB'04*, www.electricity-research.ch.
- [41] *Internetseite des Forschungsprogramms* www.electricity-research.ch. Download von Zusammenfassungen und Schluss- berichte durchgeführter Forschungsarbeiten

UMGEBUNGSWÄRME, WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG, KÄLTE

Überblicksbericht zu Forschungsprogramm 2004

Thomas Kopp (F+E)

tkopp@hsr.ch

Max Ehrbar (P+D)

max.ehrbar@ntb.ch

Fabrice Rognon

fabrice.rognon@bfe.admin.ch

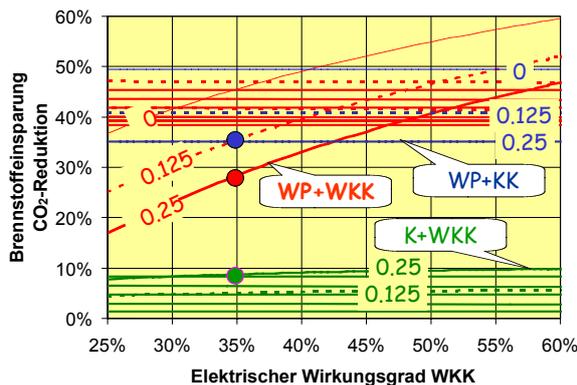


Nahwärmeverbund Bern-Lorraine

Die 450-kW-Wärmepumpe bezieht die elektrische Antriebsenergie von einem Gasmotor-Blockheizkraftwerk, das im Nachbarraum angeordnet ist (Photo Peter Morf, Zürich).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Immer noch erreicht die Bereitstellung von Wärme in der Schweiz einen Anteil von rund 75% der gesamten Nutzenergie. Diese Niedertemperaturwärme für Raumheizung und Warmwasserbereitung wird zu rund 90% mit fossilen Brennstoffen erzeugt. Dabei werden Kohlendioxid und Schadstoffe produziert. 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). Aber 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 substantielle Reduktionen



Figur 1: Brennstoffeinsparungen und CO₂-Reduktion mit der Kombination Kessel und WKK-Anlage (K+WKK), Wärmepumpe und WKK-Anlage (WP+WKK) sowie Wärmepumpe und Kombikraftwerk (WP+KK) gegenüber der Bezugsvariante Kessel und Kombikraftwerk (K+KK). Kurvenparameter: Strom-Wärme-Verhältnisse 0 (reine Wärmeproduktion), 0.125 und 0.25. Berechnungsannahmen und Berechnungsbeispiele in [46]

erzielen (Fig. 1). Zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme mit der Kombination von Wärmepumpen und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WP+WKK) wie auch mit der Kombination von Wärmepumpen und Kombikraftwerken (WP+KK) kann gegenüber der heute noch weit verbreiteten Kesselheizung schon **30% bis 50% an Brennstoff eingespart werden** [46]. Damit wird natürlich auch die **CO₂-Produktion entsprechend reduziert**. Da die Gesellschaft Wärme und elektrische Energie benötigt, muss die Erzeugung der beiden Endenergien gesamthaft analysiert werden. Für die Erzeugung von Wärme und Strom

können die Komponenten Kessel (K, nur Wärme), Wärmepumpe (WP, nur Wärme), Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlage (WKK, Wärme und Strom) und Kombikraftwerk (KK, nur Strom) für den Fall der Erzeugung von elektrischer Energie durch thermische Wärme-Kraft-Prozesse verschieden kombiniert werden.

Figur 1 zeigt die mögliche Brennstoffeinsparung gegenüber der Variante Kessel und Kombikraftwerk. Die Einsparung mit der Variante Wärmepumpe und WKK-Anlage ist dabei stark vom Wirkungsgrad der Stromproduktion der WKK-Anlage abhängig. Auch das Verhältnis der Bezüge Wärme zu Strom beeinflusst die erzielbare Brennstoffeinsparung. Das Strom-Wärmeverhältnis variiert zwischen 0 (damit reine Wärmeproduktion) und 0.25 (für die Heizsaison geschätzt für den fiktiven Grenzfall eines vollständigen Ersatzes der schweizerischen Kernkraftwerke durch WKK-Anlagen). Alle Varianten mit Einsatz von Wärmepumpen schneiden wesentlich besser ab.

Das Hauptgewicht der Aktivitäten des Programms *Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte* bleibt deshalb bei der Verbesserung und Erweiterung des Einsatzbereiches und bei der Erhöhung der ökologischen Akzeptanz von Wärmepumpen und WKK-Anlagen. Im Jahr 2004 wurden folgende Ziele verfolgt:

- Verbesserung der **Integration von Wärmepumpen in Gesamtsysteme** durch verbesserte Regelstrategien und vereinfachte Einbindungsschaltungen
- Verbesserung der **Methoden zur physikalisch richtigen Leistungsmessung**
- Verbesserung der **Wärmepumpen für hohen Temperaturhub** für die Ablösung von fossilen betriebenen Heizanlagen bei Sanierungen
- 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
- Verbesserung der **Nutzung von neuen Wärmequellen** wie Abwasserkanäle und der Nutzungsmöglichkeiten der Umgebungsluft
- Verbesserung der **Leistungszahl von Grosswärmepumpen**
- Erhöhung der **Marktakzeptanz von WKK-Anlagen**
- Verbesserung der **Leistungszahlen von Kälteanlagen**

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

WÄRMEPUMPEN

Die grösste Reduktion der fossilen Treibstoffe lässt sich durch Einsatz der Wärmepumpen für die Gebäudeheizung und für die Warmwasserbereitung erzielen. Um dem physikalischen Ideal möglichst nahe zu kommen, muss die Wärmepumpe exergetisch optimiert sein [47]. Das bedeutet in der Praxis, dass sie mit einem möglichst guten Verdichter mit hohem isentropen Wirkungsgrad und kleiner Heissgasüberhitzung, mit Wärmetauschern mit möglichst kleinen Temperaturdifferenzen, mit einer Wärmequelle mit möglichst hoher Quellentemperatur und mit einer möglichst tiefen Wärmeabgabe-Temperatur arbeiten sollte. Im Berichtsjahr wurde dieses Gesamtsystem Wärmepumpe mit zahlreichen vom Programm geförderten Forschungs-Aktivitäten signifikant verbessert.

Integration von Wärmepumpen in Gesamtsystemen

Die Wärmeverteilung im Gebäude und die Einbindung der Wärmepumpe ins Gesamtsystem spielt eine wichtige Rolle. Im Jahr 2002 konnte die für die Praxis wichtige Arbeit der Optimierung von **Standardschaltungen** [1] mit dem aufzeigen von 7 gängigen Schaltungen in optimierter Form abgeschlossen werden. Es hat sich bei der Umsetzung in der Praxis gezeigt, dass die Variante **Wärmepumpe mit Radiatoren-Heizung ohne Speicher** [2] noch nicht berücksichtigt wurde. An einem 3-Familienhaus wurde diese Variante ausgemessen und beurteilt. Eine Wärmepumpenanlage ohne hydraulischen Speicher kann betrieben werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind: maximal 40 % der Heizfläche über Thermostatventile geregelt und bei Aussenluft als Wärmequelle keine Abtaugung im Umkehrprozess-Modus durchgeführt.

Messungen aus der Praxis sind bei allen Forscherteams begehrt, um neue Ideen zu beurteilen und zu simulieren. Aus diesem Grunde wurden nun im Projekt **Messdaten von sieben Wärmepumpenanlagen in der Schweiz** [3] Datensätze aus mehreren Messkampagnen an unterschiedlichen Gebäuden zum allgemeinen Gebrauch als Vergleichs- oder Prüfdatensatz aufgearbeitet und stehen für verschiedene Situationen von Wärmepumpen-Einbindungen in Gebäuden öffentlich zugänglich zur Verfügung.

Wärmepumpen werden durch die äusseren Bedingungen und die Benutzeranforderungen geregelt. Die technische Lösung sollte dabei möglichst benutzerfreundlich, energieeffizient und

billig sein. Deshalb wird bei den meisten Reglern in kleineren Anlagen auf die Auswertung eines Raumfühlers verzichtet und die Anlage nur über die Anlagenkennlinie und die Aussentemperatur geregelt. Bei den seit einigen Jahren laufenden Forschungsaktivitäten zur **Pulsbreitenmodulation PBM** [4] (Einbringen von Wärmepaketten in den Heizkreislauf in günstigen Zeitabschnitten) konnte 2003 die Projektphase 3 abgeschlossen werden, in welcher die erarbeitete PBM-Strategie in die Regler von mehreren Herstellern implementiert werden konnte. Aus den bisherigen Phasen 1 bis 3 wurde klar ersichtlich, dass die Pulsbreitenmodulation gut und energieeffizient funktioniert. In der nun gestarteten **Projektphase 4** [5] wird durch die Arbeitsgemeinschaft *Institut für Mess- und Regeltechnik der ETH Zürich und Gabathuler AG* die PBM-Strategie auf Wärmepumpenanlagen mit Warmwasserbereitung ausgeweitet. Zusätzlich wird die Möglichkeit eines adaptiven Reglers mit Einbindung von Wetterdaten von *MeteoSchweiz* studiert.

Der Betrieb von Wärmepumpen erzeugt Schwingungen, die zu unerwünschten Lärmemissionen führen können. Frequenzgang und Intensität der Schwingungen können für Lärm und damit die Akzeptanz der Wärmepumpen in der Bevölkerung entscheidend sein. In der Arbeit **Beurteilung der Tonhaltigkeit von Wärmepumpen** [6] wurden diese Aspekte untersucht. Es steht nun ein Instrument zur Verfügung, das eine einheitliche, von subjektiven Empfindungen unabhängige Beurteilung von Lärm erlaubt. Eine Anwendung dieses Instrumentes durch die Behörden würde überall eine gleichartige Bewertung von Lärmemissionen von Wärmepumpen erlauben.

Das im Jahre 2003 publizierte Lärmschutz-Handbuch **Schallschutz bei der Aufstellung von Wärmepumpen** [7] musste im Mai 2004 nachgedruckt werden und wurde auf Wunsch der Anwender in der Westschweiz durch die französische Version **Isolation acoustique lors de l'installation de pompes à chaleur** [8] ergänzt.

Leistungsermittlungsmethoden

Im Markt werden zur Beurteilung von Wärmepumpen meistens der COP (Coefficient of Performance oder Leistungszahl) und der JNG (Jahresnutzungsgrad) herangezogen. Der COP wird in Prüfständen bei variabler Quellen- und Senktemperatur gemessen. Für den Kundennutzen ist aber der Jahresnutzungsgrad entscheidend, der die Leistungsfähigkeit der Wärmepumpenanlage

über das ganze Jahr bei variablen Aussentemperaturen und dadurch bei variablen Wärmeleistungen erfasst. Dabei muss auch die Energie für das Warmwasser erfasst werden, wenn es von der Wärmepumpe erwärmt wird. Da im Markt sehr viele verschiedene technische Lösungen vorhanden sind, ist ein objektiver, physikalisch korrekter Vergleich der Leistungsfähigkeit der Wärmepumpen-Modelle sehr schwierig. Die Methode der EN255 wird durch die in Vernehmlassung befindliche prEN 14335: *Heizungssysteme in Gebäuden - Berechnungsverfahren für Energiebedarf und Nutzungsgrad von Systemen* ersetzt werden. Nachdem im Jahr 2003, Projekte abgeschlossen werden konnten, die den Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpenanlagen (Heizung und Warmwasser) untersucht hatten ([9], [10]) wird nun der Jahresnutzungsgrad von in *MINERGIE*-Gebäuden oder *Passivhäusern* zahlreich eingesetzten Kompaktgeräten untersucht. Die bisherigen Ergebnisse des Projektes **Rechenmethode für den Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpen-Kompaktgeräten und Validierung** [11] zeigen im Sommerbetrieb einen Systemnutzungsgrad von 2.1 und einen Wärmeerzeugungsgrad von 3.4 in einem *MINERGIE*-Haus. Messungen in einem *Passivhaus* wurden im Oktober 2004 an der FH beider Basel gestartet.

Die Grundproblematik der Bewertung der Leistungen von Wärmepumpen zeigt sich auch im internationalen Umfeld. Der frühere Programmleiter Martin Zogg hat deshalb im Rahmen des *Heat Pump Programms* der IEA erfolgreich ein Projekt zur Untersuchung dieser Aspekte vorgeschlagen, das nun seit Januar 2003 unter schweizerischer Leitung der FH beider Basel in Zusammenarbeit mit 9 Ländern als **Annex 28, Test Procedure and seasonal performance calculation for residential heat pumps with combined space and domestic hot water heating** bearbeitet wird [12]. Der Fortschritt der Arbeiten kann auf der speziell eingerichteten Website www.annex28.net verfolgt werden.

Wärmepumpen für hohen Temperaturhub

Für den Sanierungsmarkt werden Wärmepumpen mit hohem Temperaturhub (bis 65°C) benötigt. Seit November 2004 ist die Wärmepumpe **Swisstop** [48] im Handel, die aus dem vom BFE initiierten Wettbewerb *Swiss Retrofit Heat Pump* entstanden ist. Die prämierte Wärmepumpe erreicht Gütegrade von etwa 45% und arbeitet mit dem Kältemittel R407C.

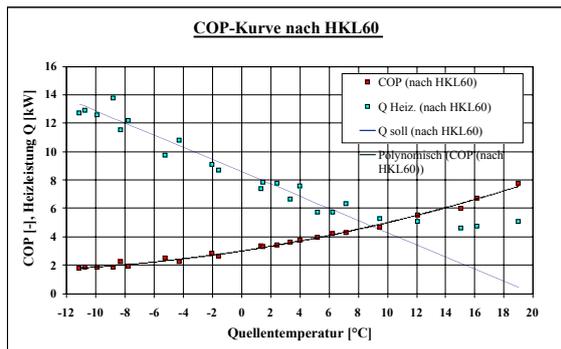
In einem theoretischen Projekt wurde ein Gütegrad von 50% für einen **gasgelagerten Mikroturbokompressor für Kältemittel** [13] berech-

net. Seit Mai 2003 arbeitet nun die Firma *OFTTech SA* (Spinoff der EPF Lausanne) am Bau und an der messtechnischen Untersuchung eines einstufigen Turbokompressors für eine Wärmepumpe mit dem Arbeitsmedium R134a im Projekt **Compresseur Radial pour Pompe à Chaleur bi-étagée, Phase 2** [14]. Die elektrisch angetriebene Welle erreicht Drehzahlen im Bereich 180'000 bis 240'000 U/Min. Der kleine Turbokompressor hat den gleichen Durchmesser wie eine Euro-Münze (Figur 2). Leider konnte der ursprünglich geplante Test des ganzen Systems mit Turbokompressor, Gaslager und Elektromotor noch nicht erfolgreich absolviert werden. Das Projektteam untersucht gegenwärtig in Einzeltests die Komponenten des Systems.



Figur 2: Turbokompressor-Rad einer einstufigen Versuchswärmepumpe mit R134a als Arbeitsmittel.

Die bisherigen zweistufigen Wärmepumpen wurden mit 2 Kompressoren in separaten Gehäusen aufgebaut. Im Projekt **Geregelte Wärmepumpe Pioneer** [15] wird ein neuer 2-stufiger Kolbenkompressor mit Economizer eingesetzt. Das Projekt der *Arbeitsgemeinschaft Solartis GmbH und FH beider Basel* untersucht auch speziell den Einfluss von variablen Drehzahlen. Der auch im einstufigen Betrieb fahrbare Kompressor kann die Drehzahl im Bereich 17 bis 117 Hz und die Ventilator-drehzahl von 5 bis 50 Hz regeln. Durch die Veränderung der Drehzahl kann die Leistung der Wärmepumpe an den Gebäudebedarf ohne ON/OFF-Betrieb angepasst werden. Im Projekt wird nun der Einfluss der Drehzahlregelung auf die Leistungszahl und auf die Herstellkosten der Wärmepumpe in Prüfstand- und Feldversuchen untersucht. Figur 3 zeigt die Heizleistung und den COP für die Beheizung eines Gebäudes mit einer Heizkennlinie, die linear zwischen den Zuständen (a) Vorlauftemperatur: 60°C, Aussentemperatur: -12°C und (b) Vorlauftemperatur: 20°C, Aussentemperatur: 20°C arbeitet. Die Umstellung



Figur 3: Heizleistung und COP der 2-stufigen Luft/Wasser Versuchswärmepumpe Pioneer in Abhängigkeit von der Quelltemperatur.

von einstufigem zu zweistufigem Betrieb hat sich bei Aussentemperaturen von 15 °C als optimal erwiesen. Die Wärmepumpe mit drehzahlregulierten Antrieben soll etwa 15 % teurer sein als Wärmepumpen mit fixen Drehzahlen.

Durch eine zweistufige Betriebsführung können noch Verbesserungen erreicht werden, insbesondere wenn das Problem mit dem Ölhaushalt eliminiert wird. Eine Möglichkeit, eine zweistufige Kompression durch einen ölfreien Kompressor zu erreichen, wird im neu gestarteten Projekt **Wärmepumpe mit Ammoniak für hohen Temperaturhub** [17] bearbeitet.

Einsatz von natürlichen Kältemitteln

Im Folgeprojekt **Ammoniak-Kleinwärmepumpe mit hohem Temperaturhub** [17] zum im Jahr 2003 beendeten Projekt **Kleinwärmepumpe mit Ammoniak** [16] wurde an der FH Rapperswil mit dem Einsatz eines zweistufigen ölfreien Verdichters ein radikal neuer Weg eingeschlagen, der auch für andere Arbeitsmedien interessant ist. Leider zeigte sich, dass verschiedene Komponenten am Verdichter nicht ammoniakbeständig waren, obwohl alle Bestellungen speziell für den Betrieb mit Ammoniak aufgegeben wurden. Die Wellenleistung vom Elektromotor wird über einen Magnetantrieb an den Kompressor übertragen, was technologisch einiges komplizierter und damit teurer ist. Aufgrund der Verträglichkeitsprobleme mit Ammoniak konnten noch keine Versuche gefahren werden, jedoch wurde zumindest das Know-how im Umgang mit Ammoniak bei mehreren Firmen erweitert. Als weitere Sicherheitsmassnahme neben der Magnetkupplung wird eine Adsorptionsmatte untersucht, die austretendes Arbeitsmedium aufnehmen kann. Feldtests mit diesen Matten sind in Vorbereitung.

Ammoniak wird seit Jahren auch in Kälteanlagen erfolgreich eingesetzt. Alle bekannten Kompres-

soren arbeiten mit Ölschmierung. Trotz guter Ölabscheider wird immer ein wenig Öl in den Kältekreis ausgetragen. Als Verbesserung der Kenntnisse für die Anwendung in Kälteanlagen und Wärmepumpen wurde an der FH Luzern zusammen mit der Firma *W. Wettstein AG* das Projekt **Ermittlung der Rolle von nicht-mischbaren Ölen bei der Direktverdampfung von Ammoniak** [18] durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen den dramatischen Effekt des Öles im Kältemittel bei der Verdampfung. Ein Ölgehalt von 0.1% reduziert die Wärmeübergangszahl bei der Verdampfung um 30%, ein Ölanteil von 0.2% um 50% und bei einem Ölanteil von 1% wird der α -Wert auf einen Drittel des Wertes ohne Öl reduziert. An der mit Längsschaugläsern ausgerüsteten Anlage konnte auch ein Einfluss der Strömungsform auf die Reduktion des α -Wertes durch das Öl ermittelt werden.

Von Seiten der Hersteller ist ein grosses Interesse am Arbeitsmittel CO_2 auszumachen. CO_2 ist ungefährlich und billig, muss aber in der Anwendung in Wärmepumpen überkritisch eingesetzt werden. Dadurch werden hohe Drücke bis zu 110 bar benötigt und die Auskopplung der Nutzwärme im so genannten Gaskühler, der anstelle des Kondensators eingesetzt wird, verlangt spezielles Know-how. In einem Ende 2003 gestarteten Projekt mit den Firmen *awtec* und der Firma *Stiebel-Eltron* wird eine **CO_2 -Wärmepumpe für Hauswasserheizung und Gebrauchswassererwärmung** [19] entwickelt, die auf schweizerische Verhältnisse optimiert ist. Der Anteil an Gebrauchswasser-Energie beträgt 50%, das Heizungswasser soll auf eine Vorlauftemperatur von 35°C erwärmt werden. Es wird ein COP von 4.5 vorausgesagt. wegen noch ungeeigneten Verdichtern ist der COP von 25% kleiner als erwartet. Im Jahr 2005 wird die vom Industriepartner konzipierte Pilot- und Demonstrationsanlage ausgemessen.

CO_2 -Prozesse sind wegen der Wärmeauskopplung aus dem Gaskühler besonders interessant für die Warmwasserbereitung. Das Trinkwasser und das CO_2 werden dabei im Gaskühler im Gegenstrom geführt. Dadurch werden hohe Exergieverluste vermieden. Bei der Renovation des Bezirksspitals Le Locle konnte die Bauherrschaft davon überzeugt werden, eine käufliche CO_2 -Prototyp-Anlage zur Warmwasserbereitung einzusetzen. Im Projekt **Mesures des données énergétiques d'une pompe à chaleur air/eau au CO_2 (R744) pour préparation d'eau chaude sanitaire dans un hôpital** [20] wird die Leistungsfähigkeit dieser Luft/Wasser-Wärmepumpe untersucht. Die Anlage hat eine Wärmeleistung von 60 kW und kann Warmwasser von 80°C herstellen. Bei ver-

schiedenen Aussentemperaturen im Bereich -20 bis +30°C werden nun die Leistungszahlen ermittelt. Der Projektbeschrieb und die direkt aktualisierten Messdaten der Wärmepumpe befinden sich auf der Website www.pac-co2.com.

Nicht direkt mit natürlichen Arbeitsmedien arbeiten die aus der Tieftemperaturtechnologie bekannten magnetischen Wärmepumpen. Da sie aber keinerlei Schadenpotential auf die Umwelt bewirken, wird das Projekt **Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz** [21] der FH Yverdon hier erwähnt. In dieser Studie soll gezeigt werden, ob die magnetische Wärmepumpe, für die heute stark verbesserte magnetische Materialien zur Verfügung stehen, bei Einsatzbedingungen im Markt Schweiz konkurrenzfähig sein kann. Es werden die typischen Anwendungsfälle für Hausheizungen mit Fussbodenheizung (Sole/Wasser, Quelle 0°C, Senke 35°C, 8 kW) und Radiatorheizung für den Ersatz von bestehenden Öl- oder Gasheizungen (Luft/Wasser, Quelle -7°C, Senke 50°C, 15 kW) untersucht. Eine Exergieanalyse und eine detaillierte Kostenschätzung sind vorgesehen.

Verbesserung der Nutzung der Wärmequellen

Im Herbst und im Frühling weisen die im Sanierungsmarkt häufig verwendeten Luft/Wasser-Wärmepumpen eine hohe Leistungszahl auf, da nur ein kleiner Temperaturhub zu überwinden ist. Bei der Wärmeentnahme aus der Umgebungsluft kommt es aber bei Temperaturen unter etwa 4 °C zur Eisbildung an den Wärmetauscherflächen und damit zu einem Abfall der Effizienz. Die vereisten Wärmeübertragungsflächen müssen deshalb von Zeit zu Zeit wieder abgetaut werden. Der dazu benötigte Energiebedarf beträgt etwa 10% der elektrischen Antriebsenergie für den Kompressor. Im abgeschlossenen Projekt **Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Phase 2: Bewertung der Abtauprozesse** [22] wurden die Abtaumethoden: Heissgasabtauung und Prozessumkehr erfolgreich untersucht. Im Folgeprojekt an der FH Buchs **Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Phase 3** [23] wurden Naturabtauung, Luftabtauung und andere alternative Abtaumethoden experimentell untersucht und bewertet. Die Ergebnisse fließen in die Konzeption von zukünftigen Luftkühlern ein.

Im Projekt **LOREF Luftkühleroptimierung durch Reduktion von Eis- und Frostbildung - Untersuchung der Frostbildung für Lamellenluftkühler von Wärmepumpen** [24] an der FH Luzern wurde die Ursache der Frostbildung

bei Aussentemperaturen von -7 bis 2°C vertieft untersucht. Mit grundlegenden Untersuchungen und einer eigens aufgebauten Versuchsanlage (Figur 4) konnten Erfahrungen und Messungen zur Frostentwicklung und zum Abtauen gewonnen werden. Alle an den Versuchsmodellen gewonnenen Erkenntnisse sollen nun im Projekt **LOREF2: Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung** [25] in eine verbesserte Wärmetauschergeometrie einfließen. Auch der Antriebsventilator und die Abtauung sollen in die Optimierung des Luftkühlers einbezogen werden. Die Messungen erfolgen an realen Wärmepumpen im 1:1-Massstab, die mit verschiedenen optimierten Luftkühlern ausgerüstet werden. Eine erhebliche Beteiligung der Industrie garantiert praxismgerechte Resultate und einen Vergleich mit den bisherigen Luftkühlern.



Figur 4: Vereister Versuchskühler im Projekt LOREF 1 [24] ; Luftströmung von rechts nach links. Deutlich ist die Anreicherung an Frost im Ablösegebiet der Zylinder, die die Verdampferrohre symbolisieren, zu sehen.

Die Erdsonde mit Glykolfüllung ist heute Stand der Technik, benötigt aber einen Wärmetauscher zwischen Sondenkreislauf und Kältekreis und eine Umwälzpumpe für die Sole in der Erdsonde. Diese zusätzlichen Wärmewiderstände vermindern die Effizienz und könnten durch eine Direktverdampfung des Kältemittels in der Sonde eliminiert werden. Im Projekt **Pumpenlose Erdwärmesonde - Phase 1: Potentialabklärung, Machbarkeitsstudie energetisch und wirtschaftlich** [26] erkannte die FH Buchs, dass der Wegfall der Umwälzpumpe bei den Glykol-Erdsonden den COP 12 bis 15% verbessern könnte. In Österreich werden pumpenlose Erdsonden für CO₂ mit Sondenlängen von 65 bis 75 m eingebaut. Für die in der Schweiz üblichen Sondenlängen von 100 bis 150 m (60% der eingebauten Sonden) bzw. 200 bis 350 m Tiefe (40% der eingebauten Sonden) müssen grössere Durchmesser von ca 40 mm ent-

wickelt werden, damit der pumpenlose Betrieb durch die freie Konvektion gewährleistet bleibt. Diese Konstruktionen müssen für höhere Drucke hergestellt werden als bei den Glykolsonden. Neben CO₂ wäre Ammoniak als Arbeitsmedium in diesen Sonden noch besser geeignet. Ferner wurde untersucht, wie die pumpenlose Erdsonde im Anwendungsfall als Kühlung betrieben werden müsste.

Ein kleineres Projekt erarbeitet die Grundlagen für eine neue **Druckprüfung für vertikale Erdsondenanlagen** [27]. Diese theoretischen und messtechnischen Arbeiten dienen als Basis für ein revidiertes FWS-Gütesiegel und die in Revision stehende Norm DIN 4279-7.

In grösseren Agglomerationen ist die **Nutzung der Abwärme aus Abwasser** eine interessante und lohnenswerte Wärmequelle. Für die Schweiz wäre diese Nutzung an ca 1'000 Standorten theoretisch möglich. Von Seiten der Kläranlagen-Betreiber sind Bedenken wegen einer zu starken Abkühlung des Kanal-Abwassers geäussert worden. Im an der EAWAG durchgeführten Forschungsprojekt **Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen** [28] wurden die zulässige Temperaturabsenkung und der Einfluss auf die Kläranlage und die Verschmutzungseigenschaften der Wärmetauscher-Materialien untersucht. Kaltwalzen der Wärmetauscherbleche im Abwasserkanal und die Variation der Fliessgeschwindigkeit kann die Verschmutzung vermindern und die Selbstreinigung erhöhen. Die Temperaturschwankungen, die durch den Betrieb des Wärmetauschers innerhalb einiger Stunden verursacht werden, können in der Kläranlage weitgehend ausgeglichen werden. Dauernde Temperaturabsenkungen haben einen Einfluss auf die Nitrifikation in der Kläranlage. Im Projekt ist eine mathematische Methode zur Abschätzung der zulässigen Temperaturabsenkung erarbeitet worden. Mit der neuen Methode und Messdaten der ARA Werdhölzli in Zürich konnten allgemeingültige Aussagen hergeleitet werden. Voraussetzungen zur Installation eines Abwasser-Wärmetauschers in der Kanalisation sind normalerweise Wassertemperaturen von über 15 °C, Kanalisationsrohre mit einem Durchmesser von 1 m oder mehr und Abwasservolumenströme bei trockenem Wetter von 20 bis 40 L/s.

Grosswärmepumpen

Grosswärmepumpen werden als nicht-seriengefertigte Anlagen von Fall zu Fall ausgelegt und aus den relevanten Komponenten vor Ort montiert. Sie können deshalb auch nicht in Prüfzentren getestet und vermessen werden. Da sie mit Leistungen zwischen 100 und 2400 kW_{thermisch}

energetisch aber sehr bedeutsam sind, wurde das Projekt **Feldmonitoring an Gross-Wärmepumpen** [29] gestartet. Bisher wurden 7 Anlagen unterschiedlicher Grösse und Ausrüstung evaluiert und für den Messbetrieb untersucht. Erste Erkenntnisse zeigen, dass die Leistungszahlen leicht unter denjenigen von kleineren Serienmodellen liegen, obwohl die Kennzahlen von grossen Anlagen wegen der kleineren relativen Verluste eher grösser sein sollten. Dies lässt vermuten, dass die einzelnen Auslegungen oder die energietechnische Integration in die Verbrauchernetze nicht überall optimal waren. Das Ziel des Projektes ist es, aufzuzeigen, wie man auch bei Grossanlagen auf Jahresarbeitszahlen von mindestens 4.0 gelangen kann.

WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG UND BLOCKHEIZ-KRAFTWERKE

Seit dem erfolgreichen Abschluss des Projektes *SwissMotor* und der Arbeiten mit einem Magermotor für Biogas sind im Bereich WKK durch das BFE keine Forschungsprojekte mehr unterstützt worden. Der Grund ist eine harte Marktsituation, die durch die vergleichsweise immer noch tiefen Preise für die fossilen Brennstoffe besonders akzentuiert wird. Im gegenwärtigen Umfeld sind WKK-Lösungen wegen den notwendigen Unterhalts- und Servicearbeiten und den erhöhten Abschreibungskosten immer noch teuer. Im industriellen Umfeld werden – ohne BFE-Unterstützung – Erfahrungen mit der von *ABB* entwickelten Mikrogasturbine gemacht und auch am von der *SIG* weiterentwickelten Stirling-BHKW wurde weitergearbeitet. Zudem werden in der Schweiz die Resultate der angekündigten Grossserie von *Whisper Tech* Geräten für den englischen Markt mit Spannung erwartet. Erstaunliche 80'000 Stück wurden von *Powergen*, dem zweitgrössten Energieversorger der britischen Inseln, für die Lieferung in den nächsten 5 Jahren bestellt [49]. Die Jahrestagung des WKK-Fachverbandes des Jahres 2004 [50] zeigte, dass trotz der Zurückhaltung des BFE einige Ideen und Projekte insbesondere mit Holz, Bioabfällen oder Klärgas umgesetzt wurden.

KÄLTE

Im Berichtsjahr wurden zwei Projekte für den zahlenmässig viel grösseren Kältemarkt (im Vergleich zum Wärmepumpenmarkt) gestartet.

Im Projekt **Hocheffiziente zweistufige Verdampfung in einer Kälteanlage** wird an einer Kälteanlage in einer Grossverteiler-Filiale eine neuartige Zweistufenverdampfung untersucht,

die aus zwei in Serie geschalteten Plattenwärmeaustauschern besteht. [30]. Die Kälteanlage arbeitet mit dem Arbeitsmedium R134a und hat eine Kälteleistung von 130 kW. Im gleichen Maschinenraum arbeitet eine umschaltbare parallele Anlage mit klassischem Verdampfer auf dasselbe Kältenetz. Bisherige Messungen zeigen einen stabilen Betrieb mit dem neuen Verdampfer und eine Energieeinsparung der Verdichter von mehr als 10%.

Das Projekt **Verdoppelung der Arbeitszahl von Wärmepumpen und Kältemaschinen mit kleinem Temperaturhub** versucht, die Problematik beim Wärmehaushalt von grösseren Geschäftsgebäuden zu verbessern [31]. Es wurde erkannt, dass die energetisch möglichen Verbesserungen zum Teil nicht erreicht werden, weil die Planer die Energieverteilung schlecht planen und zum Teil, weil die Komponenten-Industrie die für klei-

ne Temperaturhübe notwendigen Komponenten nicht anbietet. Deshalb sollen Richtlinien für Planer für die Auslegung von Anlagen mit kleinem Temperaturhub erarbeitet werden. Bisher wurden die theoretischen Berechnungen mit Messungen an einer Klimakälteanlage in einem Bürogebäude verglichen. Erste Erkenntnis ist, dass der Temperaturhub immer so klein als möglich gehalten werden sollte, dies bedeutet insbesondere, dass weder die Verdampfungs- noch die Kondensationstemperatur auf einen konstanten Wert geregelt werden darf.

Die Zusammenarbeit mit dem *Schweizerischen Verein für Kältetechnik SVK* wurde in zielgerichteten Diskussionen über anzustrebende Forschungsprojekte intensiviert. Leider erschwerten hier die Budgetkürzung für 2005 die begonnenen Pläne und die andiskutierten Projekte.

Nationale Zusammenarbeit

Durch die direkte Mitarbeit in den meist sehr anwendungsnahen Projekten beteiligt sich die **Privatwirtschaft** intensiv an der Forschungstätigkeit. Das Engagement reicht dabei von einer Beteiligung in einer Begleitgruppe bis zu Übernahme von erheblichen finanziellen Beiträgen. Da die Projektleiter häufig an einer Fachhochschule tätig sind, besteht eine besonders **intensive Beziehung zu den Fachhochschulen**. Die Projekt-Themata wirken sich dabei auch auf den Unterricht aus, denn häufig können innerhalb der BFE-unterstützten Projekte auch kostengünstige Semester- und Diplomarbeiten integriert werden. Dabei bilden die Institute an den **Fachhochschulen eigentliche Kompetenzzentren**, auch wenn sie im Sinne der offiziellen Bezeichnung für Kompetenzzentren zu klein sind. Dafür wird an diesen Instituten fachlich sehr effizient gearbeitet. Auch mit dem LENI der **EPFL** und dem IMRT der **ETHZ** besteht eine konstruktive Zusammenarbeit.

Interessierte Fachkreise werden durch Publikationen der Projektleiter und der laufenden Publikation der Ergebnisse auf der Internetseite des Programms [53] orientiert. Die bisherigen Informationen in den ENET-News werden bekanntlich aus Kostengründen gestrichen und sind zukünftig im BFE-eigenen Magazin *energia* integriert. An Workshops über abgeschlossene Forschungsprojekte wurden ausgewählte Personen aus Industrie und Markt orientiert. An der alljährlich stattfindenden UAW-Tagung konnte in ihrer 11. Auflage in Burgdorf das Thema **FAWA – Feldanalyse**

von Wärmepumpen-Anlagen [51] vor einem zahlreichen Publikum diskutiert werden. Dabei wurden die Resultate und Auswirkungen des *FAWA*-Projektes vorgestellt und die Auswirkungen auf den Betrieb von Wärmepumpen gezeigt. Das *FAWA*-Projekt wird aus Kostengründen reduziert weitergeführt [32].

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* und dem *Forschungsfonds der schweizerischen Erdölvereinigung FEV* 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. Das BFE und der *Schweizerische Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW* starten im Jahr 2005 ein Projekt zur Untersuchung der Leistung von Gasmotor-Wärmepumpen. Das weitere Pausieren des *Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft PSEL* wird sehr bedauert. Es ist aber informell immer noch ein Gedankenaustausch mit den massgebenden Personen im Gange. Ideen für gemeinsame Projekte mit einem neuen *PSEL* bestehen bereits heute. Mit dem **Stromsparfonds der Stadt Zürich** konnte gemeinsam das neue

CO₂-Wärmepumpen-Projekt [19] und das Projekt Verdoppelung der Arbeitszahl von Wärmepumpen und Kältemaschinen mit kleinem Temperaturhub [31] unterstützt werden. Auch das **Amt für Umwelt und Energie AUE des Kantons Basel-Stadt** beteiligt sich erfreulicherweise am letztgenannten Projekt.

Mit den **Branchenverbänden** besteht ein institutionalisierter Informationsfluss, denn alle wesentlichen Verbände haben ein Mitglied in der Begleitgruppe des Programms. In der *Förderge-*

meinschaft 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. Durch die Anstrengungen von BFE und FWS konnte erreicht werden, dass heute nahezu 40 % aller Neubauten mit einer Wärmepumpe ausgerüstet werden. Die Anliegen der dezentralen Erzeugung elektrischer Energie durch Wärme-Kraft-Anlagen werden durch den *WKK-Fachverband* wahrgenommen.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit erfolgte auch im Jahr 2004 vorwiegend durch bilaterale Kooperation mit Ländern, die ebenfalls ein grosses Interesse an der Weiterentwicklung und Verbreitung von Wärmepumpen haben. Auch in den wichtigen **europäischen Normengremien** vertritt die Schweiz ihre Anliegen [52]. Die FWS ist assoziiertes Mitglied der *European Heat Pump Association EHPA*, wobei der schweizerische Vertreter auch Mitglied der Begleitgruppe des Programms ist. Die Schweiz beteiligt sich aktiv am **IEA Heat Pump Programm (HPP)**. Diese aktive Rolle wird durch den von der Schweiz initiierten Annex 28 [12] unterstrichen, in dem die FH Muttenz den *Operating Agent* stellt. Neben der Schweiz sind auch die Länder Österreich, Kanada, Deutschland, Frankreich, Grossbritannien, Japan, Norwegen, Schweden und die USA beteiligt. Damit hat das Thema innerhalb des HPP die grösste internationale Beteili-

gung. Leider ist Holland, das ebenfalls ein Interesse nachgemeldet hatte, nun dennoch dem Annex aus Kostengründen nicht beigetreten. Ende 2004 mussten praktisch alle Länder wegen Budgetrestriktionen zum Teil massive Reduktionen in ihren Forschungs-Engagements vermelden. Leider steht die Schweiz hier nicht abseits.

Im *Executive Committee* des HPP der IEA wurde intensiv die im dreijährigen Turnus stattfindende 8. internationale HPP-Konferenz vom 30.5. bis zum 2.6.2005 in Las Vegas vorbereitet. Gegenwärtig sind 2 Vorträge und 7 Poster-Beiträge von Autoren aus der Schweiz gemeldet. Das BFE leistete ebenfalls einen kleinen Sponsorenbeitrag an die Organisation dieser bedeutenden Konferenz.

Die Internetseite des Forschungsprogramms [53] findet mit über 90% der Zugriffe aus dem Ausland auch international grosse Beachtung.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Wegen der Budgetkürzungen im Herbst 2003 durch die Eidgenössischen Räte wurden im Jahre 2004 keine neuen Projekte mehr ins Programm aufgenommen. Vielmehr beschränkte sich die Tätigkeit des Programmleiters darauf, die noch aktiven Projekte zu betreuen und wenn möglich zu beenden. Wegen der fast üblichen Bau- und Projektverzögerungen gab es dabei manche rechtlich schwierigen Fälle zu lösen. Im Folgenden sind diejenigen Projekte beschrieben, welche im Berichtsjahr abgeschlossen wurden.

Wärmepumpen-Tumbler: Feld- und Dauertest der Pilotanlage [33]: Die Firma *Schulthess Maschinen AG*, Wolfhausen hat einen Wärmepumpen-Tumbler für 6.5 kg Trockenwäsche ent-

wickelt und im Feldtest erprobt. Der Energieverbrauch konnte auf 0.4 kWh/kg Trockenwäsche gesenkt werden (Energielevel A). Das bekannte Problem der Prozessstabilität wurde durch eine gesteuerte Wärmeabfuhr aus der unterkühlten Kältemittelflüssigkeit elegant gelöst. Der Trockner kann bis zu einer Umgebungstemperatur von 35°C eingesetzt werden und befindet sich nun in Serieproduktion.

Heizungsanlage Hintere Aumatt, Hinterkappelen: Erfolgskontrolle Gasmotor-Wärmepumpe [34]: Die Heizanlage besteht aus einer Gasmotor-Wärmepumpe mit ca. 150 kW Antriebsleistung und 450 kW Heizleistung (Wärmequelle: Aarewasser) und zwei Öl/Gaskessel

für die Spitzenlastdeckung und als Backup-System. Die Anlage wurde Ende 1993 in Betrieb genommen. Sie versorgt eine Energiebezugsfläche von 31'775 m² mit Heizwärme (umbauter Raum 135'060 m³). Die Anlage wird seit der Heizperiode 1993/94 messtechnisch erfasst. Für die Heizsaison 2002/2003 hat die Gasmotor-Wärmepumpe bei 4528 Betriebsstunden 1'754 MWh Nutzwärme geliefert. Der Gasverbrauch betrug 1'071 MWh und der Stromverbrauch für die Hilfsantriebe 21 MWh. Daraus ergibt sich eine Arbeitszahl von 1.61, was für eine Gasmotorwärmepumpe recht gut ist. Sie hat in der Heizsaison 2002/03 rund 67% des Wärmebedarfs gedeckt.

Machine ORC (cycle organique de Rankine) du site de Châtillon/GE: L'usine de méthanisation de site de Châtillon près de Genève permet de produire du biogaz à partir de déchets verts triés et collectés sur le canton de Genève. Deux moteurs à gaz de 200 kW chacun produisent ensuite de l'électricité certifiée renouvelable. Ce site a été choisi pour expérimenter l'implantation sur les moteurs à gaz de machine à cycle de Rankine ORC d'une puissance électrique de 7 kW et 14 kW. L'adjonction d'un ORC sur la boucle du radiateur de refroidissement des moteurs permet par un cycle thermodynamique de produire de l'électricité à partir de chaleur à relativement basse température (environ 100 à 200°C). Les rendements sont modestes mais permettraient à l'avenir d'améliorer le rendement électrique d'un moteur à gaz de 5 à 10%. Malheureusement, la production de biogaz a connu de très gros problèmes techniques qui ont bloqué le projet sur plusieurs mois en 2003. L'installation a été remise en état en 2004 ce qui permettra à la machine ORC de fonctionner normalement en 2005.

Abwärmenutzung aus bestehendem Schmutzwasserkanal in Binningen [35]: 2001 wurde in der Grundlastzentrale der Wärmeversorgungsanlage Binningen eine Wärmepumpe mit ca. 330 kW Heizleistung in Betrieb genommen. Als Wärmequelle dient ungereinigtes Abwasser. Im Winter wird die Wärmepumpe fast ausschliesslich von einem BHKW mit Strom versorgt. Die Anlage läuft praktisch störungsfrei und hat eine Arbeitszahl von 3.2 (Mittel aus 2 Jahren). Eine namhafte Verschmutzung der Abwasser-Wärmetauscher konnte bis heute nicht festgestellt werden. Der CO₂-Ausstoss wird durch die Grundlast-Wärmepumpe im Vergleich zu einem mit fossiler Energie betriebenen Heizsystem um etwa 675 t pro Jahr reduziert.

ARA Buholz, Luzern, Betriebsoptimierung BHKW; Fernwärmeleitung RUAG Aerospace [36]: In der Kläranlage und Schlammverbren-

nungsanlage Buholz wurden in zwei Etappen im Wesentlichen drei Optimierungsmassnahmen durchgeführt, um eine höhere Strom- und Nutzwärmeproduktion aus dem anfallenden Klärgas zu erreichen. Zum einen wurde ein 70-m³-Warmwasserspeicher installiert, der u.a. längere Laufzeiten des BHKW und damit eine höhere Stromproduktion ermöglicht. Zum zweiten wurde ein Grossverbraucher für Wärme über eine Fernleitung an die ARA angeschlossen. Schliesslich ist im Jahr 2004 eine Klärgasaufbereitungsanlage installiert worden, um Klärgas direkt ins örtliche Gasnetz einspeisen zu können. Gemäss den Messungen konnte die Stromproduktion um 680 MWh und die Nutzwärmeabgabe um 710 MWh pro Jahr erhöht werden. Im Gegenzug wurden nach europäischem Strommix etwa 600 t CO₂ eingespart.

Installation de production combinée de chaud et de froid du nouveau bâtiment de Grünenfelder SA à Quartino [37]: Grünenfelder SA est un distributeur de produits alimentaire qui doivent être conservés à différentes températures (congélation, réfrigération et rafraîchissement). Un système de production de chaud et de froid à des multiples niveaux de température a été dessiné, de façon à éviter toute combustion sur le site et pouvoir satisfaire plusieurs utilisateurs d'eau chaude (chauffage, eau chaude sanitaires, évitement de formation de permafrost). Des mesures des bilans énergétiques ont été effectuées sur la période 1.2.2003 au 30.11.2004. Les résultats montrent bien que grâce à un niveau d'intégration énergétique élevé la dissipation d'énergie dans l'air atmosphérique a pu être baissée de plus de 41%, c'est à dire qu'on a récupéré 2'005 MWh pour les besoins de chaud en baissant à 2'810 MWh l'énergie dissipée par la tour de refroidissement.

Installation et suivi d'un couplage chaleur-force (CCF) sur le site de l'ORT à Anières [38]: L'installation est alimentée au mazout et est prévue pour couvrir les besoins électriques du bâtiment en été, sans dissipation de chaleur. La puissance électrique est de 120 kW et la puissance thermique, de 130 kW. L'objectif est de réduire la quantité d'électricité achetée au réseau tout en valorisant la chaleur pour produire de l'eau chaude sanitaire et – en hiver – pour chauffer les locaux. En hiver, la puissance électrique du CCF ne suffit pas et l'électricité est achetée au réseau. Suite à un taux d'occupation du bâtiment et donc à des besoins nettement plus faibles que prévus lors de la planification, le CCF s'est retrouvée surdimensionnée et peu rentable. Autrement, les objectifs, notamment la maîtrise de la régulation complexe, sont atteints. Le rendement électrique

s'établit à environ 39%, le rendement thermique à 43% donc le rendement global est de 82%.

Kälteverbund Bahnhof Bern, Energiecontracting mit Absorptionskältemaschinen [39]: Im Rahmen des Umbaus und der Sanierung des Hauptbahnhofs der SBB in Bern in den Jahren 2001-2004 wurde auch eine neue Kälteanlage (Kaltwasser) installiert. Dabei konnten weitere angrenzende Kälteverbraucher gewonnen werden, sodass sich die installierte Kälteleistung auf 3'000 kW summiert. Die Anlage wird im Contracting-Verfahren betrieben. Die Kälte wird als Kaltwasser 6/12°C an die Verbraucher geliefert. Die Besonderheit der Anlage besteht darin, dass zwei grosse Absorptionskältemaschinen à je 840 kW Kälteleistung installiert wurden, die mittels Fernwärme aus der KVA betrieben werden. Die restliche Kälteleistung wird durch elektrisch angetriebene Kompressions-Kältemaschinen von 4*220 kW und 1*440 kW Kälteleistung gedeckt. Zusätzlich wurde ein Rückkühlnetz (27/27°C) zur Übernahme der Abwärme dezentraler Kältemaschinen in Ladengeschäften mit einer Kühlkapazität von rund 740 kW gebaut. Im Jahre 2003 wurden 6'193'298 kWh Kälte und 1'456'934 kW Rückkühlleistung geliefert. Die Kältearbeitszahl der Absorptionswärmepumpen beträgt 0.84, diejenige der Kompressionskältemaschinen 3.12.

Pompe à chaleur sur sondes géothermiques pour chauffer et refroidir les locaux de Seematter SA à Vevey [40]: La pompe à chaleur est dimensionnée pour couvrir la totalité des besoins en chauffage d'un immeuble de bureaux et de fabrication industrielle de 6'000 m³. La puissance thermique nécessaire est de 30 kW, la puissance maximale de refroidissement nécessaire théorique est de 21 kW. La PAC fonctionne sur 3 sondes géothermiques verticales qui servent de source de chaleur en hiver et de tampon en été. La climatisation est assurée par free-cooling. Pour les pointes de demande de froid en été, la PAC peut charger un stock d'eau glacée de 500 litres. La PAC assure en hiver aussi bien le chauffage que la production d'eau chaude sanitaire. Les résultats obtenus pour l'année 2004 correspondent aux attentes: le coefficient de performance moyen (COP) de la PAC seule atteint 3.9. Le COP du système complet atteint 3.4. En free-cooling, le COP (froid) grimpe à 7.7. La chaleur et le froid produits reviennent à 7.9 cts/kWh.

Wärmepumpe mit Grundwasser für eine MINERGIE-Siedlung Bärenmatte Utzensdorf [41]: Von den geplanten vier Mehrfamilienhäusern sind derzeit zwei erstellt (Energiebezugsfläche 2'960 m²). Die Bereitstellung der Heiz- und Brauchwarmwasserwärme erfolgt zentral durch

eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit Grundwasser als Wärmequelle. Derzeit ist eine Wärmepumpe mit 142-168 kW Heizleistung installiert. Die Vorlauftemperatur für die Heizung ist auf maximal 42°C eingestellt. Die Temperatur des Brauchwarmwassers wird in einer ersten Stufe in einem Integralspeicher auf etwa den Heizungs-vorlauf erwärmt und anschliessend in einem zweiten Speicher mittels der Überhitzungswärme des heissen Kältemittels nach dem Kompressor auf etwa 60°C. Die Grundwassertemperaturen liegen zwischen 8 und 12°C. Die Arbeitszahlen lagen in der Heizsaison vom 31.10.03 bis 29.10.04 ohne Hilfsantriebe bei 5.76, mit Hilfsantrieben bei immer noch guten 3.83. Diese grosse Differenz zwischen den beiden Arbeitszahlen erklärt sich durch die Hilfsbetriebe (u.a. Grundwasserpumpe), welche bereits auf den Vollausbau ausgelegt sind.

Erdwärmesonden-Wärmepumpe des Studienzentrums Gerzensee/BE [42]: Im Studienzentrum der Schweizerischen Nationalbank wurden die beiden bestehenden Luft-Wasser-Wärmepumpen mit zusammen 180 kW Heizleistung durch zwei neue Wärmepumpen à 120 kW Heizleistung mit Erdwärmesonden als Wärmequelle ersetzt. Ein Spitzenlastkessel mit 300 kW Heizleistung ergänzt die Anlage. Der Gesamtenergieverbrauch (Strom + Öl) für Heizung, Warmwasser und Lüftung konnte um beträchtliche 53.8 % gesenkt werden. Der Ölverbrauch allein reduzierte sich von 34'800 auf 6'600 Liter. Sogar der Stromverbrauch verringerte sich von 211'000 auf 194'400 kWh pro Jahr, und dies obwohl die Wärmepumpe neu fast 91% zur Gesamtwärmeproduktion beiträgt (alt: 51%). Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe beträgt 2.58.

Heizzentrale mit indirekter Gasmotor-Wärmepumpe, Berufsschulen Bern-Lorraine, Erfolgskontrolle [43]: Im Umfeld der Berufsschule wurde ab 1997 ein Nahversorgungsnetz für Heizwärme aufgebaut. Insgesamt beträgt die Anschlussleistung der 7 angeschlossenen Objekte rund 3'000 kW und der Wärmebedarf ca. 5'750 MWh/a bei Ausletetemperatur von -8°C. Die Anlage umfasst zwei gasbefeuerte Heizkessel mit 600/1'480 kW für die Spitzenlastdeckung, ein gasbetriebenes BHKW mit 190 kW Stromerzeugung und 330 kW Nutzwärme, eine elektrisch angetriebene Wärmepumpe (320 kW Heizleistung) mit Wärmeentnahme aus dem Aare-nahen Grundwasser. Das Grundwasser wird der Heizzentrale mit max. 1'000 L/min zugeführt, in der Wärmepumpe um 3 bis 5 K abgekühlt und über einen Regenwasser-Entlastungskanal der Aare zugeführt. Die elektrische Antriebsenergie stammt im Winter vom BHKW im Sommer aus dem städ-

tischen Stromnetz. Insgesamt ist die Strombezugs- und Stromabgabebilanz neutral. Das BHKW wurde nachträglich mit einer Wärmerückgewinnungs-Wärmepumpe mit 95 kW Heizleistung zur Nutzung der Strahlungs- und Abgaskondensationswärme ergänzt. Mit der Gesamtanierung wurden auch die Vor-/Rücklauftemperaturen angepasst. Sie variieren je nach Objekt zwischen 65/45 und 80/55°C.

Die Anlage wurde vom Juni 02 bis Juni 03 messtechnisch erfasst. Bei einem Gesamtinput von 6'000 MWh (unterer Heizwert von Gas) wurden 6500 MWh Nutzwärme erzeugt. Gegenüber einem reinen Gaskesselbetrieb mit 92% Kesselwirkungsgrad bedeutet dies eine Energieeinsparung von etwa 18%. Die Wärmeproduktionsanteile liegen bei 53% für die Heizkessel, 26% für das BHKW (inkl. WRG-WP) und 21% für die Grundwasser-Wärmepumpe. Die Laufzeiten der Wärmepumpen und des BHKW liegen bei 4'200-4'300 h pro Jahr. Die Arbeitszahlen der Grundwasser-Elektrowärmepumpe liegen bei 2.82, diejenigen der Abwärme-Wärmepumpe bei 4.6. Der thermische Wirkungsgrad des BHKW (Stromproduktion) liegt bei 27%. Die Kombination aus BHKW, WRG-Wärmepumpe und Grundwasser-Wärmepumpe kommt auf ein Wärmeverhältnis (Nutzwärme/unterer Heizwert) von 1.37. Bei Verwendung von Wärmepumpen in Grossanlagen ist dem Rücklauf-temperaturmanagement besonderes Augenmerk zu widmen.

Nutzung von Abwasser-Wärme aus der ARA Arbon für den Wärmeverbund Salwiese-Bleiche [44]: Für die Beheizung von fünf Wohngebieten und dem Werkhof betreiben die Stadtwerke Arbon eine zentrale Heizanlage, die im Jahr 2002 von 150 auf 540 kW erweitert wurde (geplanter Endausbau 760 kW). Die Heizanlage ist bivalent. Neben einem Heizkessel von 720 kW Heizleistung sind vier elektrisch angetriebene Wärmepumpen von 1x80 und 3x100 kW Heizleistung und je zwei Leistungsstufen vorhanden, die als Wärmequelle gereinigtes Abwasser benutzen (mit Zwischenkreis). Obwohl die Wärmepumpen nur etwa 70% der maximal geforderten Wärmeleistung erbringen, decken sie doch rund 95 % des jährlichen Wärmebedarfs ab. Die Vor- und Rücklauftemperaturen ab Wärmepumpe liegen bei einer Auslegetemperaturen von $T_u = -8^\circ\text{C}$ bei 55/45°C (Vor-/Rücklauftemperatur Wärmeverteilung 48/35°C). Auf der Quellenseite wird eine Auslegetemperatur von 8/4°C unterlegt (Abwasser 10/7°C). Die Heizwärme wird über ein Nahverteilnetz den Objekten zugeführt. Die Brauchwarmwasserbereitung erfolgt separat. Für die Betriebsperiode 15.6.03 bis 11.6.04 wird eine Arbeitszahl von

3.41 angegeben. Es traten Verschmutzungsprobleme im Abwasser-Wärmetauscher auf, die zu häufigen Reinigungen Anlass gaben. Trotz Abhilfemassnahmen scheint eine periodische Reinigung notwendig.

Grosswärmepumpe für Nahwärmeverbund Rebenstrasse Nord Etappe C, Arbon [45]: Das Gebiet Rebenstrasse Nord in Arbon mit einer Grundstücksfläche von 30'000 m² wurde von den Stadtwerken Arbon vollumfänglich mit einem Nahwärmeverbund erschlossen. Als Wärmelieferant wurde eine monovalente Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdwärmesonden als Wärmequelle gewählt. Die Anlage ging im April 2003 in Betrieb. Die geplante Ausbauleistung der beiden Wärmepumpen beträgt zusammen 340 kW, wobei zum Berichtszeitpunkt nur 97 kW effektiv angeschlossen waren. Es handelt sich um Wärmepumpen mit drehzahlgeregelten Schraubenkompressoren (Leistungsvariation 25 bis 100%). In einer ersten Etappe wurden rund 4'000 m Erdwärmesonden mit Tiefen von 210 bis 240 m verlegt (Endausbau ca. 5'500 m). Die spezifischen Erdsondenbelastungen betragen im Endausbau 46 W/m resp. 82 kWh/m/a. Die Vorlauftemperaturen ab Wärmepumpe waren bei Auslegetemperatur mit 45°C geplant (Direktanschluss der Häuser), mussten aber auf Wunsch einiger Wärmebezügler um 5 K angehoben werden, um höhere Raumtemperaturen zu erreichen. Im ersten Betriebsjahr 2003/2004 betrug die Arbeitszahl 3.9 (ohne Nebenantriebe) resp. 3.3 (mit Nebenantrieben). Erwartet worden war eine JAZ von 4.0. Die Abweichung nach unten lässt sich jedoch mit den höheren Vorlauftemperaturen und der schlechten Auslastung der Wärmepumpen (viel Teillastbetrieb, nur 97 kW von geplanten 340 kW angeschlossen, Solepumpe mit konstanter Drehzahl) erklären.

PAC au CO₂ pour la préparation d'eau chaude sanitaire de l'Hôpital du Locle/NE: Installation d'une pompe à chaleur air/eau, d'une puissance de 60 kW, utilisant comme réfrigérant du CO₂ (R 744) avec ballon d'eau chaude de 2'000 litres pour les expériences et mesures, qui sera exploitée sur le site de l'Hôpital du Locle (NE), sur une période de 2 ans. La PAC assure la préparation d'eau chaude sanitaire à des températures de 60 à 80 °C, avec température d'eau froide de 10 °C. La mise en service a été effectuée avec succès en novembre 2003. Les mesures détaillées et interprétation font l'objet d'un projet dans le cadre du programme de recherche (voir [20]).

Bei den abschliessend beurteilbaren **Wärmepumpen** zeigt es sich, dass Grossanlagen nicht bessere Arbeitszahlen liefern als Kleinanlagen. Tiefe Arbeitszahlen beruhen vorwiegend auf konzepti-

onellen, planerischen Mängeln. Der Bereich der Arbeitszahlen liegt bei den Elektro-Wärmepumpen zwischen 2.58 und 3.83, mit einem Mittelwert von 3.26. Dies liegt knapp unter dem Mittelwert aus den FAWA-Messungen für Sole-Wasser-Wärmepumpen unter 20 kW Heizleistung. (Siehe Tabelle 1)

Bei den **gasmotorisch angetriebenen Wärmepumpen** (direkt-mechanisch oder indirekt-elektrisch gekuppelt) sind ebenfalls noch deutliche Verbesserungspotentiale bezüglich energetischer Effizienz vorhanden. Da für die Beurteilung nur zwei Anlagen vorliegen, können keine allgemeinen Schlussfolgerungen gezogen werden. Immerhin zeigt die eine Anlage mit einem Wärmeverhältnis von 1.61, was schon heute technisch möglich ist. Für einen fairen Vergleich zwischen den verbrennungsmotorischen Wärmepumpen und den Elektro-Wärmepumpen müsste die gesamte Energiewandlungskette vom Kraftwerk bis zur Wärmepumpe in der Arbeitszahl berücksichtigt werden. Würde man die für die Wärmepumpe benötigte elektrische Energie ebenfalls

aus fossilen Brennstoffen, d.h. insbesondere Gas, erzeugen, dann müsste man bei Annahme eines GUD-Kraftwerks mit 60% thermischem Wirkungsgrad und einem Übertragungswirkungsgrad der elektrischen Energie im Netz von 90%, die Arbeitszahlen der Elektro-Wärmepumpe mit dem Faktor 0.54 multiplizieren. Damit käme man auf ein durchschnittliches Wärmeverhältnis (von der Wärmepumpe erzeugte Nutzwärme zu Heizwert-Input im Kraftwerk) von $0.54 \cdot 3.26 = 1.76$. (Siehe Tabelle 2)

Es zeigt sich, dass die Forschung allein noch keine guten Feldresultate garantiert. Vor allem bei Grosswärmepumpen, d.h. Anlagen die mehrere Objekte über einen Nahwärmeverbund und unterschiedlichen Bezugsanforderungen mit Wärme beliefern müssen, stellen sich planerisch und konzeptionell knifflige Fragen. Hier liegt noch viel Verbesserungs- und Ausbildungspotential. Daher wurde im Forschungsprogramm das Projekt Feldmonitoring an Gross-Wärmepumpe gestartet (siehe [29]).

Tabelle 1

Typ der Anlage	Arbeitszahl	Heizleistung [kW]	Wärmequelle
Elektro-WP	3.20	330	Schmutzwasser
EWP	3.83	160	Grundwasser
EWP	2.58	240	Erdwärme
Elektro-WP	3.41	380	Gereinigtes Abwasser
Elektro-WP	3.30	340	Erdwärme

Tabelle 2

Typ der Anlage	Arbeitszahl/Wärmeverhältnis	Heizleistung [kW]	Wärmequelle
Gasmotor-WP	1.61	450	Aarewasser
BHKW+Elektro-WP	1.37	615	Grundwasser

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Die im **Konzept der Energieforschung des Bundes 2000 – 2003** [54] anvisierten Ziele konnten mit den bisher abgeschlossenen **Forschungsarbeiten** grösstenteils erreicht werden. Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln haben je-

doch die Marktreife noch nicht erreicht. Erfreulich ist die Gründung einer Produktionsgemeinschaft bestehend aus den Firmen *KWT AG*, *Steinmann Apparatebau AG* und *Friap AG* für die vom Forschungsprogramm geförderte *Swiss Retrofit Heat*

Pump für den Sanierungsmarkt. Die im **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004–2007** [54] genannten Steigerungen der Jahresarbeitszahlen bedingen eine stetige Forschungsanstrengung, wobei die exergetische Optimierung und die bessere Integration der Wärmepumpen in die Gebäude eine zentrale Bedeutung einnimmt [31]. Ein Problem stellt hier das träge Verhalten der durch den Kälte-Markt dominierten Komponenten-Hersteller dar, welche neuartige Komponenten nur schleppend in ihr Verkaufsprogramm aufnehmen. Immerhin kann jetzt ein Scroll-Kompressor mit einem Economizer-Anschluss, der schon einige Zeit in Forschungsarbeiten eingesetzt und untersucht wurde, im Handel erworben werden. In den nächsten Jahren kommt die Möglichkeit, mit Wärmepumpen im Sommer zu kühlen, aufgrund der meteorologischen Entwicklung und aufgrund des erhöhten Komfort-Bedarfs der Bevölkerung, eine immer grössere Bedeutung zu. Hier kann die Heizungs-Wärmepumpe gegenüber den fossil betriebenen Heizsystemen einen marktentscheidenden Zusatz-Nutzen anbieten, der von den Herstellern und Planern noch besser ausgenutzt werden sollte. Diese zusätzliche Aufgabe bedingt auch noch zusätzliche Forschungsarbeit auf der Komponenten- und der System-Integrationssebene. In den Bereich Kälte, die maschinentechnisch auch durch eine Wärmepumpe erzeugt wird, sollen in Zukunft vermehrt Forschungsgelder investiert werden. Umsatzmässig ist der Kältemarkt grösser als der Wärmepumpenmarkt. Fortschritte können in beiden Märkten gewinnbringend umgesetzt werden. Da die Preise für fossile Energieträger im nächsten Jahr nicht signifikant weiter steigen dürften, ist eine grössere Verbreitung der WKK-Anlagen nicht wahrscheinlich. Trotzdem sollen die begonnenen Entwicklungen fortgesetzt werden, da die gesamtenergetische Integration der WKK-Anlagen ein enormes Einsparungspotential an Brennstoffen und an CO₂-Ausstoss beinhalten [46].

Bei der **Umsetzung** zeigt sich, dass Grosswärmepumpen nicht a priori bessere Arbeitszahlen lie-

fern als Kleinanlagen. Nicht wenige Anlagen erreichen die gesteckten Ziele bei den *Arbeitszahlen* von 3.0 bei Sanierungen resp. 4.0 bei Neuanlagen nicht. Dies liegt vorwiegend bei konzeptionellen und planerischen Mängeln. Diese Vorgaben sind aus dem Blickwinkel der Energieeinsparung sinnvoll und machbar. Es hat sich gezeigt, dass die Investitionskosten pro installiertem kW Heizleitung stark variieren können. Damit ist – nochmals – bewiesen, dass die Forschung allein noch keine guten Feldresultate garantiert. Hilfsantriebe seitens der Wärmequelle werden zu oft überdimensioniert und verschlechtern die Effizienz dramatisch. Auch in wirtschaftlicher Hinsicht muss noch einiges verbessert werden. Es macht keinen Sinn, Anlagenkonzeptionen zu empfehlen, die in der Erstellung und Wartung teuer sind, ohne dass deswegen bessere Energiekennwerte erzielt werden. Erst eine fertig ausgeführte Anlage zeigt das wahre Ausmass der energetischen Effizienz und der Kostensituation auf. Diese Themen werden im Forschungsprogramm behandelt.

Sowohl die Programmleiter als auch die Begleitgruppe des Programms sind inzwischen mehr denn je überzeugt, dass ein Folgeinstrument für **P+D** benötigt wird. Dies wird derzeit sogar als mindestens so wichtig für die Durchsetzung von energie- und kosteneffizienten Anlagen angeschaut wie die Forschung. Als ergänzendes Element ist das Monitoring im Bereich der Umsetzung unverzichtbar und effizient. P+D-Abklärungen sind auch im internationalen Vergleich ein vorbildliches Instrument.

Im Berichtsjahr haben die Forschungsanstrengungen im UAW-Programm alle zur Verfügung stehenden Finanzmittel aufgebraucht. Mehrere Projekte laufen bis 2005, einige sogar bis 2006. Durch die massive Budgetreduktion von einem Drittel können im Jahr 2005 keine neuen Projekte mehr abgeschlossen werden. Wir hoffen, dass gute Ideen aus der Wärmepumpen-Szene Anfangs 2006 wieder unterstützt werden können.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

Alle Berichte (ausser [7] und [8]) können unter www.waermepumpe.ch heruntergeladen werden.

- [1] H.R. Gabathuler, H. Mayer (gabathuler.ag@bluewin.ch), Gabathuler AG, Diessenhofen & Th. Afjei, FH MuttENZ: **Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen, Teil 1: Planungshilfe** (SB) ♦ H.R. Gabathuler, H. Mayer, Gabathuler AG, Diessenhofen & P. Renaud (pierre.renaud@planair.ch) PLANAIR, La Sagne & Th. Afjei, FH MuttENZ: **Schémas standard pour petites installations de pompes à chaleur, 1^{re} partie : fiches techniques** (SB) ♦ Th. Afjei (t.afjei@fhbb.ch), U. Schonhardt, C. Wemhöner, FHBB MuttENZ & G. Zweifel, M. Achermann, R. von Euw, U. Stöckli, FH Horw & H.R. Gabathuler,

- H. Mayer, Gabathuler AG, *Diessenhofen*, & M. Erb, Eicher+Pauli, *Liestal*: **Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen, Teil 2: Grundlagen und Computersimulationen** (SB).
- [2] H.R. Gabathuler, H. Mayer (gabathuler.ag@bluewin.ch), Gabathuler AG, *Diessenhofen*: **Wärmepumpenanlage mit Heizkörperheizung ohne Speicher** (SB).
- [3] H.R. Gabathuler, H. Mayer (gabathuler.ag@bluewin.ch), Gabathuler AG, *Diessenhofen*: **Messdaten von sieben Wärmepumpenanlagen in der Schweiz** (SB).
- [4] E. Shafai, M. Bianchi (shafai@imrt.mavt.ethz.ch), Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH Zürich & H.R. Gabathuler, H. Mayer, Gabathuler AG, *Diessenhofen* & R. Frei, J. Bruderer, SATAG Thermotechnik AG Arbon & B. Illi, F. Sidler, Siemens Building Technologies AG, *Zug*: **Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase 3: Vergleich der PBM-Regler auf dem dynamischen Prüfstand** (SB).
- [5] E. Shafai, M. Bianchi (shafai@imrt.mavt.ethz.ch), Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH Zürich: **Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase 4: Erweiterung der PBM-Regler für Kombianlagen** (JB 2004).
- [6] U. Bopp Urs, R. Ercolino, N. Lang, (u.bopp@fhbb.ch), Trefzer Rosa + Partner GmbH, *Nusshof*: **Beurteilung der Tonhaltigkeit gemäss Anhang 6 der LSV für Luft/Wasser-Wärmepumpen** (SB).
- [7] G. Völkel, Sulzer Innotec (gottfried.voelkel@sulzer.com), K. Baschnagel, EMPA, P. Hubacher, Hubacher Engineering, *Engelburg*: **Schallschutz bei der Aufstellung von Wärmepumpen** (Vertrieb durch Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS, Steinerstrasse 37, 3000 Bern 16, www.fws.ch).
- [8] G. Völkel, Sulzer Innotec (gottfried.voelkel@sulzer.com), K. Baschnagel, EMPA, P. Hubacher, Hubacher Engineering, *Engelburg*: **Isolation acoustique lors de l'installation de pompes à chaleur** (Distribution par le Groupement promotionnel suisse pour les pompes à chaleur GSP, Ch. Des Mornex 6, Case postale 338, 1001 Lausanne, www.pac.ch).
- [9] C. Wemhöner, Th. Afjei (c.wemhoener@fhbb.ch), FHBB *Muttenz*: **Seasonal performance calculation for residential heat pumps with combined space heating and hot water production (FHBB Method)** (final report).
- [10] A. Montani (andre.montani@axpo.ch), Wärmepumpentestzentrum Töss, *Winterthur*: **Wärmepumpentest für die kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung** (SB).
- [11] Th. Afjei, R. Dott, D. Helfenfinger, D. Huber, P. Keller, C. Wemhöner, (t.afjei@fhbb.ch), FHBB *Muttenz*: **Calculation method for the seasonal performance of heat pump compact units and validation** (annual report).
- [12] C. Wemhöner, Th. Afjei (c.wemhoener@fhbb.ch), FHBB *Muttenz*: **Operating Agent IEA HPP Annex 28** (JB 2004).
- [13] J. Schiffmann (jurg.schiffmann@ofttech.com), OFFTECH SA, *Lausanne*: **Compresseur radial pour pompe à chaleur bi-étagée, Phase 1 : Étude de faisabilité**, (SB).
- [14] J. Schiffmann, A. Molyneaux, D. Favrat (jurg.schiffmann@ofttech.com), OFFTECH SA, *Lausanne*: **Compresseur radial pour pompe à chaleur bi-étagée, Phase 2 ('Projet')**, (JB 2004).
- [15] H.J. Eggenberger, (tzwp@datacomm.ch), Solartis GmbH, Füllinsdorf & M. Borer, Th. Borer, P. von Boeckh, FHBB *Muttenz*: **Geregelte Wärmepumpe Pioneer** (JB 2004).
- [16] E. Geisser, Th. Kopp (tkopp@hsr.ch), FH *Rapperswil* & UNEX AG, *Zürich* & KAPAG AG, *Zumikon* & Ecopac AG, *Herrliberg*: **Kleinwärmepumpe mit Ammoniak, Phase 3: Flügelzellenverdichter mit Economizer und Schraubenverdichter** (SB).
- [17] D. Stauffer (dstauffer@hsr.ch), FH *Rapperswil* & A. Flück, UNEX AG *Zürich*: **Ammoniak-Kleinwärmepumpe für hohen Temperaturhub**, (JB 2004).
- [18] P. Aecherli, T. Boyman (tboyman@hta.fhz.ch), HTA *Luzern* & W. Wettstein AG, *Gümligen*: **Ermittlung der Rolle von nicht-mischbaren Ölen bei der Direktverdampfung von Ammoniak** (SB).
- [19] M. Friedl, J. Ganz, R. Kern, (markus.friedl@awtec.ch), awtec AG, *Zürich*: **CO₂-Heiz- und Gebrauchswasser-Wärmepumpe** (JB 2004).
- [20] H. Anstett, P. Anstett (info@pac-co2.com) Pac-co2.ch / Recherche et Développement, *Neuchâtel*: **Mesure des données énergétique d'une pompe à chaleur air/eau au CO₂ (R744) pour préparation d'eau sanitaire dans un hôpital** (JB 2004).
- [21] P. Egolf, A. Kitanovski, O. Sari (peter.egolf@eivd.ch), École d'Ingénieurs du Canton de Vaud *Yverdon*: **Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz** (JB 2004).
- [22] S. Bertsch, M. Ehrbar (ehrbat@ntb.ch), FH *Buchs* & P. Hubacher, Hubacher Engineering, *Engelburg*: **Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Phase 2: Bewertung der Abtauprozesse** (SB).
- [23] M. Ehrbar (ehrbat@ntb.ch), FH *Buchs* & P. Hubacher, Hubacher Engineering, *Engelburg*: **Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Phase 3** (SB).
- [24] L. Berlinger, K. Hilfiker, H. Huber, M. Imholz, R. Sahinagic, (hjhuber@hta.fhz.ch), HTA *Luzern*, *Horw*: **Luftkühleroptimierung durch Reduktion von Eis- und Frostbildung; Untersuchung der Frostbildung für Lamellenkühler von Wärmepumpen** (SB).
- [25] H. Huber (hjhuber@hta.fhz.ch), HTA *Luzern*, *Horw*: **LoREF2: Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung** (JB 2004).
- [26] A. Peterlunger, M. Ehrbar (ehrbat@ntb.ch), FH *Buchs* & S. Bassetti, E. Rohner, Geowatt AG, *Zürich*: **Pumpenlose Erdwärmesonde Phase 1: Potentialabklärung, Machbarkeitsstudie energetisch und wirtschaftlich** (SB).
- [27] E. Rohner (rohner@geowatt.ch) Geowatt AG, *Zürich*: **Anpassen der Druckprüfung nach DIN 4279-7 für vertikale Erdsonden aus Polyethylen** (JB 2004).
- [28] O. Wanner (wanner@eawag.ch), EAWAG, *Dübendorf*: **Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen** (SB).

- [29] P. Hubacher (he-ko@bluewin.ch), Hubacher Engineering, Engelburg & M. Ehrbar, FH Buchs, Buchs: **Feldmonitoring an Grosswärmepumpen** (JB 2004).
- [30] E. Hänni, R. Meister (remo.meister@bms-ch.com), BMS-Energieanlagen AG, Wilderswil: **Hocheffiziente zweistufige Verdampfung in einer Kälteanlage** (JB 2004).
- [31] B. Kegel, H. Richter, B. Wellig (beat.kegel@ebp.ch), Ernst Basler + Partner AG, Zürich: **Verdoppelung der Arbeitszahl von Wärmepumpen und Kältemaschinen mit kleinem Temperaturhub** (JB 2004).
- [32] WPZ Wärmepumpentestzentrum Buchs (www.wpz.ch), **QS-WP/QP: Qualitäts-Prüfung von Klein-Wärmepumpen mittels Norm- und Feldmessungen**, Teilprojekt Langzeitverhalten (JB 2004).

Liste der (2004 abgeschlossenen) P+D-Projekte

- [33] N. Blümig, R. Gatter, Schukthess Maschinen AG, Landstrasse 37, CH-8633 Wolfhalden: **Wärmepumpen-Tumbler** (SB).
- [34] F. Hämmerlin, Ing.-Büro für Haustechnik, Wyhalenstrasse 4, CH-3032 Hinterkappelen: **Heizungsanlage Hintere Aumatt 3032 Hinterkappelen, Erfolgskontrolle Gasmotor-Wärmepumpe** (SB).
- [35] M. Dietler, Wärmeversorgung Binningen AG, c/o Elektra Birseck Münchenstein, Weidenstrasse 27, CH-4142 Münchenstein: **Abwärmenutzung aus bestehendem Schmutzwasserkanal in Binningen, Energiebilanz und Betriebsverhalten im Jahr 2003** (SB).
- [36] R. Christen, KWP Energieplan, Turbistrasse 14, CH-6281 Hochdorf: **ARA Buholz, 6000 Luzern, Betriebsoptimierung BHKW, Fernwärmeleitung RUAG Aerospace** (SB).
- [37] V. Curti, Termogamma SA, Via Industria, CH-6710 Biasca: **Installation de production combinée de chaud et de froid du nouveau bâtiment de Grunenfelder SA à Quartino** (SB).
- [38] E. Conti, Conti & associés Ingénieur SIA, CH-1800 Vevey: **Installation et suivi d'un couplage chaleur-force (CCF) sur le site de l'ORT à Anières (GE)** (SB).
- [39] M. Bretscher, Energie Wasser Bern, Energiedienstleistungen, Monbijoustrasse 11, CH-3001 Bern: **Kälteverbund Bahnhof Bern, Energiecontracting mit Absorptionskältemaschinen** (SB).
- [40] M. Lüthi et al., Roger Seematter SA, CH-1800 Vevey: **Pompe à chaleur pour chauffer et refroidir une PME** (SB).
- [41] B. Eggen, M. Stöckli, Dr.Eicher+Pauli AG, Zinggstrasse 1, CH-3007 Bern: **Erfolgskontrolle Wärmepumpe mit Grundwasser für eine MINERGIE-Siedlung, Bärenmatte Utzensdorf** (SB).
- [42] P. Kuhn, Vaterlaus AG, Erlenuweg 6, CH-3110 Müningen: **EWS-WP (Erdwärmesonde-Wärmepumpe) des Studienzentrums Gerzensee/BE** (SB).
- [43] B. Eggen, S. Lanz, Dr.Eicher+Pauli AG, Zinggstrasse 1, CH-3007 Bern: **Erfolgskontrolle Heizzentrale mit indirekter Gasmotor-Wärmepumpe, Berufsschulen Lorraine** (SB).
- [44] R.Nijssen, Durena AG, Sägestrasse 6, CH-5600 Lenzburg: **Nutzung von Abwasser-Wärme aus der ARA Arbon für den Wärmeverbund Salwiese-Bleiche, Betriebserfahrungen** (SB).
- [45] D. Zürcher, Durena AG, Sägestrasse 6, CH-5600 Lenzburg: **Grosswärmepumpe für Nahwärmeverbund Rebenstrasse Nord Etappe C, Arbon, Erstes Betriebsjahr** (SB).

Referenzen

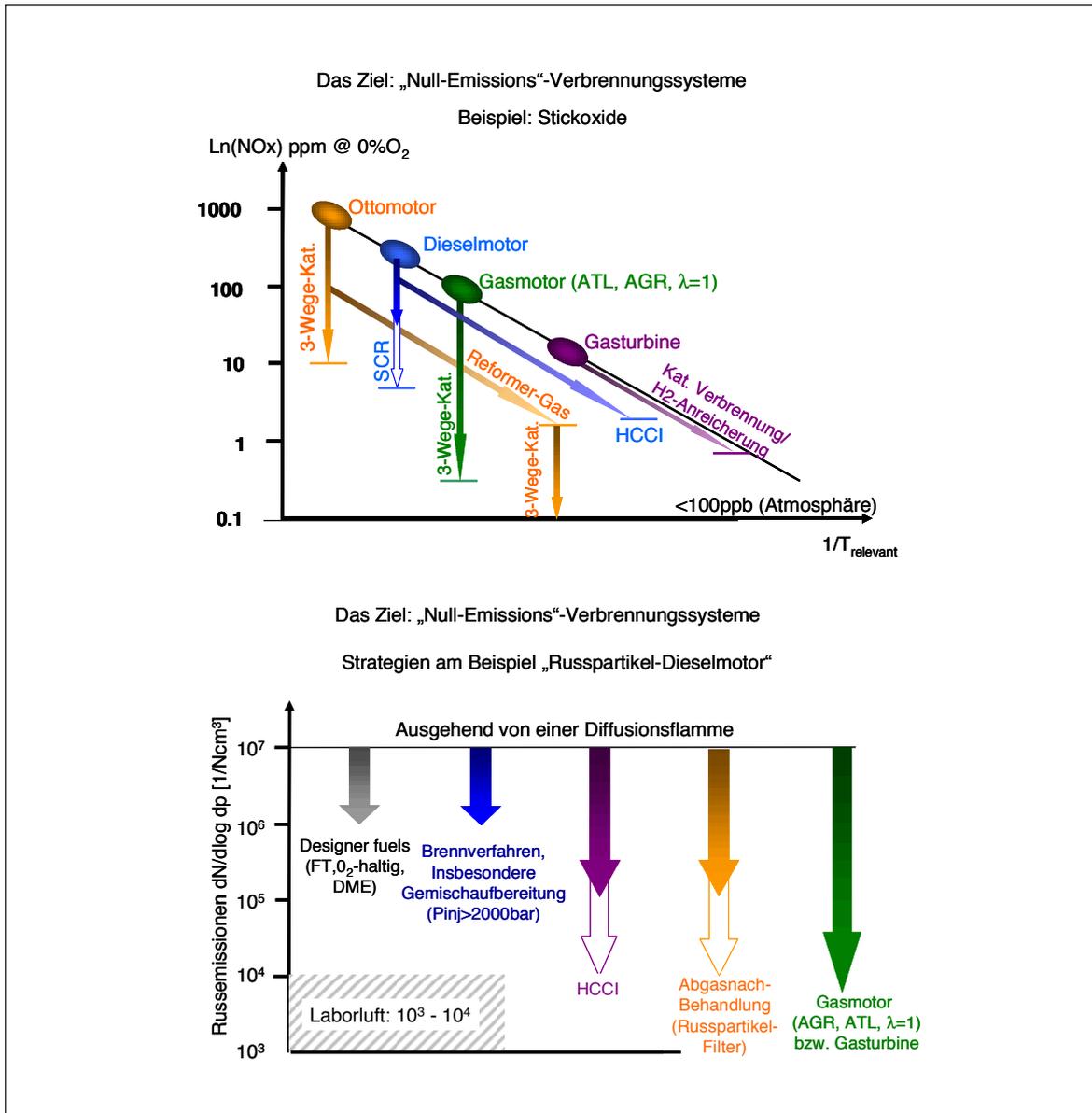
- [46] M. Zogg: Wärme und Strom aus Brennstoffen – effizient und umweltschonend, Gas-Wasser-Abwasser gwa 82(2002)12, 907/912; Download ab [60].
- [47] Th. Kopp: Ausblick in die zukünftigen F+E-Aktivitäten im UAW-Programm, aus Tagungsband zur 10. UAW-Tagung vom 25.6.03, Seiten 87 – 96, 2003.
- [48] www.friap.ch
- [49] M. Gailfuss in Sonne Wind & Wärme 12/2004, Seite 77: **Stirling-BHKW aus Neuseeland**.
- [50] WKK-Fachverband: www.waermekraftkopplung.ch.
- [51] F. Rognon (fabrice.rognon@bfe.admin.ch) BFE, Bern: **FAWA – Feldanalyse von Wärmepumpen-Anlagen**, Tagungsband zur 11. Tagung des Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte des Bundesamtes für Energie.
- [52] Normenaktivitäten werden auf der Website www.fws.ch dokumentiert.
- [53] Internetseite des Forschungsprogramms: www.waermepumpe.ch/fe Rubrik Berichte: Download von Zusammenfassungen und der ausführlichen Schlussberichte durchgeführter Forschungsarbeiten, Rubrik Publikationen: Download von Publikationen des Programmleiters.
- [54] Konzept der Energieforschung des Bundes: www.energie-schweiz.ch/internet/03095/index.html?lang=de.

FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Alphons Hintermann

alphons.hintermann@bfe.admin.ch



Das Potential moderner Verbrennungstechnologien ist noch lange nicht ausgeschöpft

Die Zukunft der Verbrennungstechnologien heisst *Null-Schadstoff-Emissionssysteme*. Das Bild oben zeigt die heute möglichen Absenkpfade der NO_x -Emissionen. Das Bild unten zeigt Absenkpfade für Dieselmotoren, für welche die Russemissionen aus dem Auspuff geringer sind als der Russgehalt der Umgebungsluft (Quelle: K. Boulouchos, ETHZ). Ein Teil dieser Absenkpfade ist schon heute in Prototypen realisiert und wird in absehbarer Zeit Stand der Technik sein.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Fossile Energieträger werden noch lange einen Grossteil unseres Energiebedarfs abdecken. Sie werden jedoch in absehbarer Zukunft in zunehmendem Masse durch Biomasse, synthetische Brennstoffe (Designer Fuels) und Wasserstoff abgelöst werden. Hingegen wird die Verbrennungstechnologie auch für diese Brennstoffe noch lange die dominante Konkurrenz zur Brennstoffzellentechnologie im Energiewandlungsprozess bleiben. Auch für ein künftig geändertes Brennstoffspektrum werden Effizienzsteigerung und Schadstoffminimierung die zentralen Ziele der Verbrennungsforschung sein und dieselben Absempfade (siehe Titelbild) gültig bleiben.

Das Programm *Verbrennung* leistet seit 1988 Beiträge zur **simultanen Verbesserung der Energieeffizienz technischer Verbrennungssysteme sowie zur Reduktion derer Emissionen**. Mit diesen Zielsetzungen und dank kontinuierlicher Unterstützung durch das BFE konnten an verschiedenen Hochschulinstituten die Grundlagen moderner Verbrennungstechnologien sukzessive erarbeitet, verstanden und mit einiger Zeitverzögerung mit unterschiedlichem Erfolg in käufliche Produkte umgesetzt werden. Die seit Beginn des Programms definierte **Fokussierung der Forschung auf experimentelle Messtechnik, numerische Simulation und Schadstoff-**

reduktion mit optimaler Energieeffizienz hat sich bewährt und bildet den Schlüssel zur Optimierung der Verbrennungstechnologien auch bei geändertem Brennstoffspektrum.

Ein wichtiges Element im Jahr 2004 bestand darin, aufbauend auf dem **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007** [42], ein Forschungskonzept für das Programm *Verbrennung* für dieselbe Periode der CORE vorzustellen. Die generellen **Ziele** im Programm **Verbrennung 2004 – 2007** [43] entsprachen auch den Zielen für das Berichtsjahr:

- Sicherstellung der Qualität und Kontinuität in Forschung und Entwicklung,
- Ausbildung von Ingenieuren in den Verbrennungstechnologiebereichen,
- verstärkte Umsetzung der Forschungsergebnisse mit neuen und bestehenden Industriepartnern,
- Vernetzung der Kompetenzen und Umsetzung des vorhandenen Fachwissens mit Industriepartnern aus der Motoren-, Brenner- und Gasturbinenbranche in marktfähige Produkte,
- bessere Vernetzung der Aktivitäten der ETH Zürich, PSI und EMPA mit den Fachhochschulen
- Verstärkung der Kommunikation des Programms nach aussen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

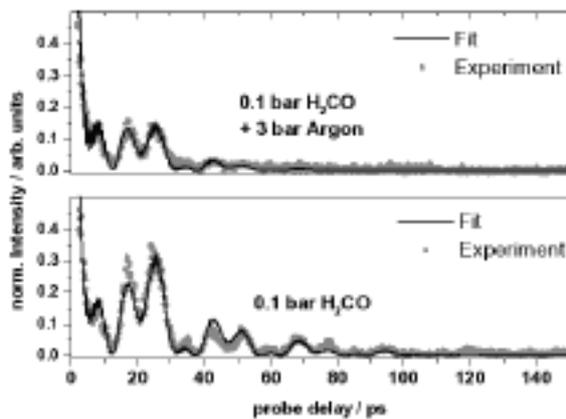
OPTISCHE MESSMETHODEN

Optische Messmethoden haben eine Schlüsselrolle bei der Untersuchung der Grundlagen reaktionskinetischer Verbrennungs-Phänomene und der Validierung von numerisch modellierten Verbrennungsprozessen. Beispielsweise zeigen OH-PLIF-Messungen, dass die Flammenposition nicht vom Druck in der Brennkammer von Gasturbinen abhängt, obwohl nach chemisch-kinetischen Gesichtspunkten der Gesamt-Reaktionsumsatz – und damit die Flammengeschwindigkeit – mit höherem Druck reduziert werden müsste. Die gewonnenen Resultate lassen sich als Druckunabhängigkeit der turbulenten Flammengeschwindigkeit interpretieren und haben damit wesentliche Implikationen für die zukünftige Auslegung von Gasturbinen-Brennern und –Brennkammern, die bei noch höherem Druck (> 30 bar) betrieben werden sollen, als dies heute üblicherweise der Fall ist. Im opti-

malen Zünden von Verbrennungsgemischen liegt ein wesentliches Potential zur Effizienzsteigerung der Verbrennung und zur Senkung der Emissionen, sowohl bei der motorischen Verbrennung als auch bei der Verbrennung in Gasturbinen. Daher ist es wichtig, die bei der Zündung ablaufenden Prozesse sowohl theoretisch als auch experimentell sehr genau zu analysieren.

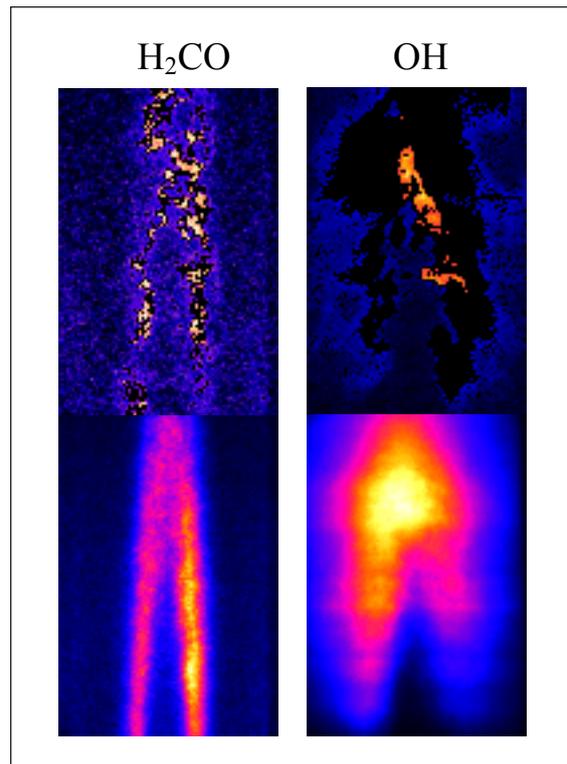
Die PSI-Gruppe *Reaktionsanalyse* untersucht seit einigen Jahren die Reaktionskonstanten von Formaldehyd, einem wichtigen Zwischenprodukt in Flammen. Sie hat mit BFE-Mitteln die dazu notwendigen spektroskopischen Methoden entwickelt. Mit zwei vom SNF finanzierten Doktoranden [27, 28] werden diese Arbeiten fortgeführt. Neben Formaldehyd spielen Peroxylradikale eine wesentliche Rolle beim Zünden brennbarer Gemische. Im neuen Projekt **Investigation of reactions and species dominating low tem-**

perature combustion [1] bildet die Rolle dieser Radikale in einer kalten Flamme ($< 1000^\circ \text{K}$) den Fokus. Peroxyle bestimmen das Zündverhalten und beeinflussen die Spezies-Verteilung der anfänglich vorhandenen Zwischenprodukte und somit die Entwicklung der weiteren Reaktionspfade. Für die Darstellung von Peroxyen müssen die Laborinstrumente mit geeigneten Radikal-Quellen ausgerüstet werden. Diese Aufgabe ist nicht theoretisch, sondern nur im Experiment lösbar. Deshalb wurden photolytische und pyrolytische Quellen sowie Entladungsquellen realisiert und getestet. Ein Fit erster Messungen (Fig. 1) für das Referenz-Molekül H_2CO (Formaldehyd), bei dem nur die Vibrations-Zustände mit einem bestimmten physikalischen Modell berücksichtigt wurden, zeigt schon eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und experimenteller Beobachtung. Der zusätzliche Einbezug der Rotations-Zustände ist in Vorbereitung.



Figur 1: Transienten von fs-CARS Messungen in H_2CO . (Quelle PSI)

Die PSI-Gruppe *Verbrennungsdiagnostik* befasst sich im Projekt **Quantitative Laser Induced Fluorescence (LIF) in Combustion** [2] mit der Anwendung von LIF sowohl bei Gasturbinen- als auch bei Laborbrennern. Im Berichtsjahr wurden die Grenzen der 2-D-LIF Methode (Fig. 2) für die Radikale CH und CH_2O weiter ausgelotet. Gezeigt wurde, dass die beiden Radikale als Marker für die Flammenfront, zur Bestimmung der Form der Reaktionszone oder zur quantitativen Bestimmung der Wärmefreisetzung in Flammen herangezogen werden können. Diese experimentellen Grundlagen sind von hoher Relevanz im P+D-Projekt [11] und im KTI-Projekt **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brennern** [21].



Figur 2: Beispiele von «single pulse»(oben) und «averaged»(unten) LIF-Bildern der transienten Radikale H_2CO und OH in einer turbulenten Vormischflamme. (Quelle PSI).

Eine weitere Projektaufgabe besteht darin, an einem speziellen Laborbrenner Gegenstromflammen von Methan/Luft und Wasserstoff/Luft detailliert experimentell zu untersuchen. Die auch für reale Brenner typischen Verhaltensmuster wie Flammenlöschen/(-wieder)-Zünden und Übergänge zwischen verschiedenen Flammenstrukturen werden an den Modell-Flammen ausgemessen und die zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen untersucht. Numerisch berechnete Voraussagen über lokales Auslösen von Flammen und deren Stabilisierung durch geeignete Massnahmen konnten inzwischen experimentell bestätigt werden. Die sehr enge Zusammenarbeit zwischen den PSI-Experimentatoren und den Modellierern vom LAV der ETH-Zürich ist einer der Erfolgsfaktoren bei dieser Aufgabe [32].

Das im Jahr 2003 abgeschlossene Projekt **Experiment turbulente Gegenstromflamme** hat zu 2 Dissertationen Anlass gegeben, die im Berichtsjahr weitergeführt wurden. Die erarbeiteten Datenbasen stellen eine hervorragende Grundlage für Modell-Validierungen dar. Validierte Rechen-codes gewinnen immer mehr Bedeutung bei Industriepartnern und leisten einen Beitrag zur Kostensenkung bei der Entwicklung effizienter, emissionsarmer Verbrennungstechnologien.

NUMERISCHE SIMULATION VON VERBRENNUNGSPROZESSEN

Im interdisziplinären Projekt **Large Eddy-Simulation (LES) in der turbulenten Verbrennung** [3], in dem die vier ETHZ Institute: *Seminar für angewandte Mathematik (SAM)*, *Institut für Fluidodynamik (IFD)*, *Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV)* und *Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTNT)* zuarbeiten, entwickelte das SAM eine neuartige, mehrdimensionale Lagrange-Transportmethode. Diese basiert auf Darstellungen von Strömungselementen als *Langrange'sche Finite Volumina*, die bewegt und deformiert werden. Der LAV- und IFD-Projektteil stand im Zeichen der Grobstruktursimulation eines isothermen, turbulenten Freistrahls mit einer Reynoldszahl von 2000. Zur Berechnung der exakten Geschwindigkeitsstatistiken – einer wichtigen Voraussetzung für das korrekte Verhalten der Strahl-Diffusionsflamme – wurde ein *Inflow-Generator* in den Code eingebaut. Die zusätzliche grosse Sensitivität des Verhaltens des turbulenten Freistrahls auf die Randbedingungen am Mantel der Rechendomaine und die Einführung eines neuen Konzepts der Verbrennungsmodellierung führten jedoch zu Projektverzögerungen. Das in den letzten Jahren am LTNT entwickelte transiente Flamelet-Modell wurde mit einigen Verbesserungen im CFX-Code eingebunden und ist im Vergleich mit der Sandia-D-Flamme [29] getestet worden. Erste Auswertungen zeigen, dass sowohl der Mischungsbruch als auch das Temperaturprofil entlang der Flammenachse viel besser reproduziert werden können als mit den bisherigen Modellen.

Mit der Entwicklung zuverlässiger und genauer Simulationswerkzeuge treibt das LAV die Optimierung von Verbrennungssystemen hinsichtlich des Zielkonflikts Energieeffizienz (CO₂-Reduktion) und Schadstoffemissionen im Projekt **Direkte numerische Simulation (DNS) der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen** [4] voran. Die DNS ist eine leistungsfähige Methode für die detaillierte Analyse von Verbrennungsprozessen. Der am LAV entwickelte parallele, dreidimensionale DNS Code basiert auf der Methode der spektralen Elemente, welche die geometrische Flexibilität eines Finite-Elemente-Ansatzes mit der Genauigkeit der spektralen Methode vereinigt und insbesondere für die Simulation geometrisch komplexer Anordnungen geeignet ist. Die Chemie und die Transportprozesse sind zurzeit durch vereinfachte Modelle beschrieben. Der Code wird für die Untersuchung von laminaren und transitionalen Verbrennungsprozessen angewendet. Basierend auf diesem Code wurde auch der Ansatz der Large

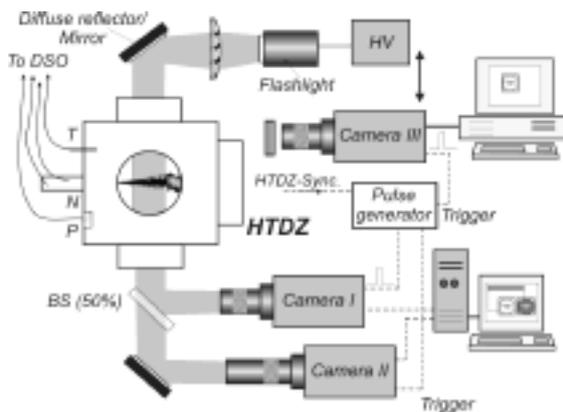
Eddy Simulation (LES) zur Berechnung turbulenter Verbrennungsvorgänge implementiert. Die perfekte Skalierbarkeit des parallelen Codes erlaubte es, Instabilitäten in Diffusionsflammen nahe der Auslöschung in einem dreidimensionalen Jet zu untersuchen und die zellförmigen Strukturen die experimentell an der ETH-Lausanne beobachtet wurden, zu simulieren. Im Berichtsjahr wurde der Code mit einem parallelen Integrator für steife Differentialgleichungen auf detaillierte Chemie und Transport erweitert und wird zurzeit auf die Simulation pulsierender Diffusionsflammen angewendet.

Im neuen Projekt **Lattice Boltzmann Simulationen für chemisch reaktive Systeme im Mikrobereich** [5] wird eine neue Annäherung für die rechengestützte Strömungsdynamik im Mikrometer-Skalenbereich hergeleitet. Die Lattice Boltzmann Methode ist ein Kompromiss zwischen dem simplifizierten hydrodynamischen und dem rein molekulardynamischen Ansatz und soll den für Mikroreaktoren wichtigen Bereich der Knudsen-Zahl (freie Weglänge/Poren- bzw. Kanaldurchmesser) von 0.1 bis 1 möglichst gut beschreiben.

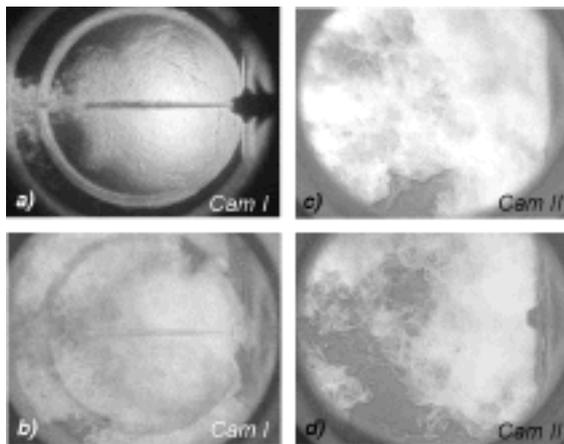
Im Projekt **Weiterentwicklung des Pluto-Brenners** arbeitet das LTNT eng mit der Firma *Toby AG* in Solothurn, zusammen. Der Pluto-Brenner, ein Ölverdampfungsbrenner im Leistungsbereich 5 - 15 kW, mit guten Marktchancen, soll neu als kondensierender Wärmeerzeuger konzipiert werden. Die Brenner-Modellierungserfahrungen des LTNT sind direkt in die Entwicklungsschritte des *Pluto-Brenners* eingeflossen. In einem KTI-Folgeprojekt sollen im Jahr 2005 neue Simulationsrechnungen die notwendigen Schritte in Richtung billigerer Produktion einleiten.

SCHADSTOFFREDUKTION UND -ASPEKTE

Die Optimierung der Dieselmotor-Verbrennungsprozesse hinsichtlich Leistung, Abgase und Russ ist ein vordringliches Ziel einer nachhaltigen Mobilität. Ein detailliertes Verständnis der im Motorbrennraum ablaufenden Prozesse kann nicht allein durch Optimierungsprozesse am fertigen Motor, sondern nur durch Untersuchung aller elementaren verbrennungsrelevanten Vorgänge in verschiedenen Phasen des Motorzyklus erreicht werden. Dazu steht am PSI ein in Zusammenarbeit mit dem LAV aufgebauter Prüfstand zur Verfügung, mit dem Sprayflammen vom Beginn der Einspritzung bis zum Ausbilden einer stabilen Flamme untersucht werden können. Das Projekt **Investigation of Spray Combustion in Constant Volume Combustion Cell** [6] wurde im



Figur 3: Optische Anordnung zur Aufnahme von Bildserien der Flammen/Russemission während der Sprayverbrennung in der HTDZ. P: Drucksensor, N: Brennstoffdüse, T: Thermoelement, BS: Strahlteiler (50%)



Figur 4: Zeitserienbilder der Flammen-Russemission während der Dieselverbrennung in der HTDZ. Triggerzeiten nach Start der Injektion (in ms): 10.8 (Bild a), 16.2 (Bild b), 19 (Bild c), 27.3 (Bild d). Belichtungszeiten: je $5 \mu\text{s}$ (Bild a, b) bzw. $2 \mu\text{s}$ (Bild c, d).

Berichtsjahr abgeschlossen und im Folgeprojekt **Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressures** [7] konnten durch den Einsatz zweier unabhängig aktivierbarer intensivierter CCD-Kameras mit schneller Bildauslesung 4-Bild-Sequenzen eines einzelnen Einspritz- und Verbrennungsvorganges aufgenommen werden (Fig. 3). Dies erlaubt den flexiblen und kombinierten Einsatz verschiedener Visualisierungsverfahren, wie elastische Lichtstreuung, Schattenabbildung, Chemilumineszenz, laser-induzierte Inkandescenz (LII) bzw. laser-induzierte Fluoreszenz (Fig. 4).

Die für die Auswertung der experimentellen LII-Signale notwendigen Simulationsprogramme sind einsatzbereit. Die Erfahrungen aus dem Betrieb und der Entwicklung optischer Messverfahren an der HTDZ fließen auch in das Mitte 2004 gestartete EU-Projekt **HERCULES** [18] ein und kommen am anwendungsnahen Prüfstand der Firma *Wärtsilä* (Winterthur) zur Untersuchung der Gemischbildung und Verbrennung in Schiffsdieselmotoren zum Einsatz.

Die Einführung der Common-Rail (CR) Einspritztechnologie erweiterte die Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Wärmefreisetzungsrates dramatisch. Innermotorische Massnahmen, welche im direkten Zusammenhang mit der Einspritzung stehen, sind die Optimierung des Einspritzdrucks, des Einspritzzeitpunktes und des Einspritzprofils (durch Mehrfacheinspritzungen) möglich. Speziell zu erwähnen ist die Entkopplung des Einspritzdrucks von der Drehzahl mit der CR-Technologie. In Bezug auf Emissionen sind weitere Massnahmen im Luftpfad zu nennen wie die Abgasrückführung und Ladeluftkühlung sowie eine Optimierung der Kraftstoffzusammensetzung. Generell ist ein Trend absehbar, die Vorteile der Diffusionsverbrennung mit denen der Vormischverbrennung zu kombinieren und gleichzeitig die Nachteile der beiden Brennvorgänge möglichst zu vermeiden. Ein dominantes Problem bei der Diffusionsverbrennung stellt dabei der NO_x-Russ trade-off dar. Der NO_x-Ausstoss kann durch eine Senkung der Prozesstemperaturen vermindert werden. Für die Oxidierung von Russ sind jedoch hohe Temperaturen vorteilhaft. Die Kraftstoffkonzentration ist für die Bildung von Russ von entscheidender Bedeutung. Im Projekt **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** [8] werden spezifische Experimente durchgeführt, um die Komplexität des Dieselverbrennungsprozesses besser zu verstehen.

Beim Dieselmotor ist die Gemischbildungsqualität für die homogene Kompressionszündverbrennung magerer Gemische zwecks Erzielen tieferer Stickoxid- und Russemissionen von hoher Wichtigkeit. Im Projekt **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennvorgänge und motorische Arbeits-Prozesse** [9] werden zündfähige, schwerverdampfende Kraftstoffe (meistens Dieseldestillate), die als Flüssigkeit in den Brennraum eingespritzt werden, experimentell und numerisch untersucht. Experimentiert wurde an der Hochdruck-Hochtemperatur Zelle (HDTZ) der ETH Zürich und am Einhubtriebwerk, das seit Herbst 2004 operativ ist. Das angewandte Schlierenverfahren erwies sich als sehr sensitiv und in Kom-

bination mit der Schattenbildtechnik gelang eine qualitative Unterscheidung zwischen der Flüssig- und der Dampfphase. Ergänzende Aufnahmen der passiven OH-Chemilumineszenz erlaubte es, den Entflammungsort und den Zündzeitpunkt festzustellen. Damit wurde eine gute Datenbasis für die Validierung der numerischen Modelle erarbeitet.

Numerische Schwerpunkte sind die Analyse detaillierter Reaktionsmechanismen für Alkane und deren Reduktion auf die wesentlichsten Reaktionen, sowie deren Koppelung mit Mehrzonenmodellen und kompletten 3D-Strömungssimulationen. Gezielt sollen Modelle erstellt werden,

welche die Gemischaufbereitung, die Zündung, die Verbrennung sowie die Schadstoffbildung homogen betriebener kompressionsgezündeten Motoren berechnen. Mit dem Simulations-Ansatz der Reaktionspfadanalyse, der Wärmefreisetzungsanalyse und deren Optimierung mit bio-inspirierten Algorithmen scheint ein Durchbruch bei der Mechanismenreduktion gelungen zu sein. Die Ergebnisse mit dem Vielzonenmodell sind vielversprechend und werden bald bei ausgewählten Betriebspunkten der Projektpartner zur Anwendung gelangen. Das Ziel ist ein effizient einzusetzendes Instrument zur industriellen Entwicklung eines HCCI Motors.

Nationale Zusammenarbeit

Die zur Realisierung von *Null-Emission*-Verbrennungssystemen notwendige Grundlagenforschung kann nur an Hochschulen erarbeitet werden und wurde langfristig durch BFE-Mittel an der ETH-Zürich im Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV) und im Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTNT) sowie am PSI und an der EMPA gefördert. Die enge Zusammenarbeit dieser Institutionen mit Motorenherstellern in der Schweiz (*Liebherr Machines SA, Iveco und Wärtsilä NSD*) sowie mit dem Gasturbinenhersteller *ALSTOM POWER* hat Tradition und gewährleistet eine rasche Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis. Nicht zu unterschätzen ist auch die Zusammenarbeit der Hochschulinstitute mit Industriepartnern aus der Zulieferindustrie der Automobilbranche wie *ABB-Turbosystems, Kistler, Common Rail Technologies, Bosch*, u.a. Seit Jahren besteht eine gute Zusammenarbeit der ETH-Zürich und der EMPA mit der Fachhochschule Biel.

Die umsetzungsnahen **KTI-Projekte** profitieren von den BFE-Vorleistungen an den Hochschulen. Das Projekt **Modellierung und Auslegung eines CO_2 und NO_x freien Brenners für Alstom Power Gasturbinen** [20] wurde anfangs 2004 erfolgreich beendet. Verzögerungen weist das Projekt **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brenner** [21] auf. Die Erkenntnisse dieses Vorhabens sollen der Verbesserung der laufenden Generation von *Alstom*-Gasturbinen dienen. Im Projekt **Grundlagen der H_2 -Reformat-Zumischung am Ottomotor** [22] erarbeiten die FH-Biel, das LAV und

der Industrie-Partner *Robert Bosch GmbH* Beiträge zur weiteren Absenkung der Emissionen sowie zur Erhöhung des Wirkungsgrades im Teillastbereich. Ziel der Partner LAV und *Kistler AG* im Projekt **Industrietaugliche Lichtwellenleiter-Messkette zur Bestimmung der Russmenge, der Russtemperatur und des Zündverzugs im Verbrennungsmotor** [23] ist die Realisierung einer Lichtwellenleiter-Sondenspitze, mit welcher im Brennraum kurbelwinkelaufgelöst gemessen werden kann. Sie soll die Umsetzung neuer Einspritz- und Verbrennungsstrategien in künftigen Motorengeneration ermöglichen, um strengere Emissionsgrenzwerte zu erfüllen. Im Projekt **Simulationswerkzeuge für die Optimierung der Brennverfahrenentwicklung bei Grossdiesel-Motoren** [24] wird die Kompetenz des LAV im Bereich der 3-D Simulation von Verbrennungssystemen zur Realisierung eines praxistauglichen Werkzeuges für die Vorausberechnung/Auslegung zukünftiger Produkte des Industriepartners *Wärtsilä Winterthur* beitragen.

Die Zusammenarbeit der Hochschulinstitute mit Fachhochschulen konnte im Berichtsjahr durch neue KTI-Projekte intensiviert werden. Die EMPA entwickelt im Projekt **Schaumkeramik für neuartige keramische Porenbrenner** [25] langzeitstabile Materialien, die beim Industriepartner umgesetzt werden sollen. Die FHBB entwickelt im Vorhaben **CATVAP-Burner** [26] neue Katalysatoren für den Einsatz der CATVAP-Technik in Öl- und Gasbrennern, die später vom Industriepartner gefertigt und in seinen Brennern eingesetzt werden sollen. Das umtec der FH-Rapperswil beendete ein vom BUWAL unterstütztes Projekt zum Thema **Stickoxid-Reduktion bei mobilen Dieselmotoren**.

toren [19]. Eine vermehrte Zusammenarbeit mit dem PSI ist anzustreben.

Der Vernetzung von Hochschulforschung mit den Fachhochschulen und der Privatwirtschaft diente die Tagung des **Schweizerischen Vereins für**

Verbrennungsforschung (SVV) vom Oktober 2004, die unter dem Motto **Anwendungsorientierte Verbrennungs-Forschung in der Schweiz** [30] am *ALSTOM POWER Technology Centre* in Baden Dättwil abgehalten wurde.

Internationale Zusammenarbeit

Das Jahrestreffen der **European Research Community on Flow Turbulence and Combustion (ERCOFTAC)** und des *Leonhard Euler Kompetenzzentrums für Messtechnik, Verbrennung und Schadstoffformation* wurde am 1. Oktober 2004 am *ALSTOM POWER Technology Centre* in Baden Dättwil zum Thema: *Measuring Techniques, Combustion and Pollutant Formation* durchgeführt.

Betreffend Zusammenarbeit innerhalb des IEA-Implementing Agreements **Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion** www.im.na.cnr.it/IEA/ wird im Executive Committee die Möglichkeit der Zusammenarbeit in Subtasks ins Auge gefasst. Diesbezügliche Untergruppen treffen sich seit einiger Zeit, um gemeinsame Ziele und Aufgaben zu diskutieren. Eine Beteiligung der Forschungsgruppen des PSI und der ETHZ ist vorgesehen. Das jährliche *Task Leaders Meeting*, das im August 2004 in Helsinki durchgeführt wurde [31], bot Schweizer Forschern die Gelegenheit, ihre bestehenden Kontakte, u.a. mit dem *Sandia National Laboratory* (USA), dem *National Research Council* (Kanada) und insbesondere mit den anwesenden Japanern zu pflegen und sich in die Untergruppen einzubringen.

Mit über 1200 Teilnehmern, rund 300 Vorträgen und 480 *Work in progress*-Postern war das **30th International Combustion Symposium 2004** in Chicago das herausragende Ereignis des Jahres. Mit je vier Vorträgen [32- 35] und Postern [36- 39] war die Schweiz gut vertreten.

Weiter zunehmend ist die Teilnehmerzahl der seit 1997 jährlich an der ETHZ abgehaltenen, u.a. vom BFE und BUWAL unterstützten Nanopartikel-Konferenz. Organisatoren sind das LAV/ETHZ, die FH-Aargau und die Firma *TTM* (Niederrohrdorf). Etwa 250 Teilnehmer (neuer Rekord!) aus Europa, Nordamerika, dem fernen Osten und Australien nahmen im August 2004 an der Konferenz teil, um Erfahrungen und neues Wissen zu Russpartikeln aus der dieselmotorischen Verbrennung auszutauschen. Das BUWAL finanzierte die CD-

Rom [40] mit den *Proceedings* und weiteren Informationen.

Die Ergebnisse des Projekts **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse** [9] fliessen weiterhin in das internationale Forschungsprojekt **Homogene Dieselverbrennung** der deutschen *Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen* ein. Diese Forschungsvereinigung finanziert das LAV zusätzlich zum BFE.

Im EU-Projekt **HERCULES (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships)** innerhalb des 6. Rahmenprogramms werden neue Technologien in Bezug auf Schiffsmotoren entwickelt. Schweizer Partner sind *Wärtsilä/CH*, *ABB Turbosystems*, das LAV, das PSI und die EMPA. Das LAV befasst sich mit der Anwendung und Erweiterung von Verbrennungsprozess-Simulationsmodellen, für dessen Entwicklung und Validierung experimentelle Daten benötigt werden. Mit Unterstützung des LAV und des PSI wird bei *Wärtsilä Schweiz* ein Versuchsstand aufgebaut, mit welchem relevante Bedingungen des Verbrennungssystems grosser Zweitakt-Schiffsdieselmotoren experimentell realisiert werden können. Kernstück der Anlage ist eine Spray/Verbrennungskammer mit äusserst flexibler optischer Zugänglichkeit, variablen realistischen Strömungsbedingungen und einem realen Einspritzsystem, dessen konstruktive Auslegung heute vorliegt. Zusammen mit *Wärtsilä* konnten anhand von numerischen Simulationen die analytischen Auslegungsberechnungen und die konstruktiven Anforderungen im Detail überprüft werden.

Die erwähnten Institutionen im ETH-Bereich arbeiten intensiv mit ausländischen Unternehmen zusammen. Es bestehen gemeinsame Projekte mit *GM*, *VW*, *Opel*, *Renault*, *ALV*, *Iveco* und der *Forschungs-Vereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.* in Deutschland.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die Erkenntnisse aus dem abgeschlossenen Projekt **Demonstration eines optischen Sensors zur Unterstützung der Entwicklung von schadstoffarmen motorischen Verbrennungssystemen** [10] haben starkes Interesse seitens der Industrie ausgelöst. Die miniaturisierte Messsonde soll auch an kleinen Motoren minimalinvasive, optische Messungen ermöglichen.

Eine der grössten Herausforderungen für die weltweite Verbrennungsforschung auf dem Gebiet der turbulenten Vormischflammen ist das Verständnis und die quantitative Beschreibung der Turbulenz-Chemie-Wechselwirkung. Dazu ist im Projekt **Struktur- und Brenneigenschaften von turbulenten vorgemischten Hochdruckflammen** [11] vor allem die Interaktion von Turbulenz und chemischer Reaktion bei den spezifischen Betriebsbedingungen einer stationären Gasturbinenbrennkammer von Interesse. Die Projektziele 2004: Bestimmung der turbulenten Flammengeschwindigkeit anhand der statistischen Auswertung von OH-PLIF Messungen und die Durchführung von H_2CO -PLIF Messungen bei CH_4 /Luft-Hochdruckflammen, sowie erste Messungen zur Bestimmung der mageren Löschgrenzen bei CH_4/H_2 /Luft-Gemischen sind erreicht worden. Der Einfluss der Turbulenz auf die Flammenfront (Position, Struktur) und die NO_x -Emissionen wurden detailliert untersucht (Fig. 5).

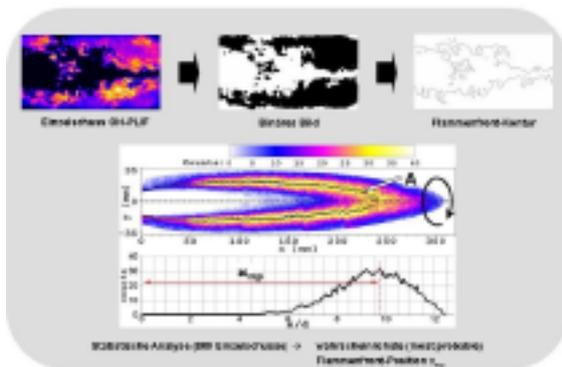
Diese experimentellen Daten sind für die Validierung numerischer Flammenmodelle, die künftig zur Auslegung industrieller Gasturbinen mit höherem Gesamtwirkungsgrad und tieferen Emissionen eingesetzt werden sollen, von grosser Bedeutung.

Die Ergebnisse des abgeschlossenen Projekts **NO_x -Verminderung bei mobilen Dieselmotoren**

ren mittels Harnstoff-SCR [17] sind weiterhin aktuell und werden zur Zeit mit PSI-eigenen Mitteln weitergeführt.

Die Arbeiten im Projekt **Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO_2 -Ausstoss** [12] umfassten im Jahr 2004 die Konstruktion der internen Gas Entnahme-Sonde (IGE-Sonde). Die Auslegungsparameter für die IGE-Sonde wurden so erarbeitet, dass die Probleme bei der Inbetriebnahme möglichst minimiert werden. Das Verhalten der Gase während einer Entnahme mit der IGE-Sonde wurde mittels 3-D Rechnung (StarCD) simuliert, daraus Optimierungspfade abgeleitet und nach Möglichkeit genutzt. Da **LIEBHERR** mit der Lieferung des D934 Direct Injection-Dieselmotors mit Vierventiltechnik in Verzug war, konnte das erstellte und getestete 3-D Simulationsmodell noch nicht validiert werden. Sobald dies erfolgt ist, soll eine Bestandesaufnahme gemacht werden, welche das Potential des für die *Tier 3* Abgasnorm zertifizierten Motors bezüglich der kommenden Norm *Tier 4* darstellen soll. Dabei sollen Variationen von PLD-Parametern, und evtl. Aufladung und Verdichtung untersucht werden. Im Bereich der Messtechnik und Abgasanalytik wird eng mit der EMPA zusammengearbeitet.

Als Vorbereitung einer zukünftigen Zusammenarbeit mit der Automobilindustrie auf dem Gebiet reduzierter CO_2 -Emissionen im Teillastbereich war das Projekt **Massnahmen zur Reduktion der CO_2 -Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** [13] vorgesehen. Die ursprüngliche Idee war, ein erstes Konzept eines neuen verbrennungsmotorischen Ansatzes rechnerisch auszuarbeiten. In der Folge wurden intensive Kontakte mit einer Firma in Deutschland geknüpft und nach langem Austausch ein Konzept definiert. Dabei zeigte sich aber, dass den Industriepartnern eine reinere Konstruktionsarbeit an der ETH vorschwebte und die finanziellen Mittel dazu ungenügend waren. Gleichzeitig verlagerte sich das Interesse für die Analyse und Optimierung zukünftiger Antriebssysteme in Richtung der Berücksichtigung von Kraftstoff-Reformern, Abgasnachbehandlungssystemen und optimierten elektrischen Unterstützungssystemen. Daher wurde das Projekt neu mit Schwerpunkt auf die Entwicklung einer schnellen Software ausgerichtet, die zur Weiterentwicklung der thermochemischen (z. T. elektrischen) Analyse von Antriebstechnologien dient, und soll im Jahr 2005



Figur 5: Methode zur Bestimmung der wahrscheinlichen Flammenfront-Position und Flammenoberfläche.

abgeschlossen werden. Dieser Software kommt die LAV-Grundlagenexpertise für Verbrennungssysteme (inkl. Microflows) und Reaktoren zugute. Sie ermöglicht nach ihrer Fertigstellung, sowohl zukünftige Technologien durch eine sehr effiziente Simulation zu beurteilen, als auch die Optimierung im Teillastbereich mit besseren Realisierungschancen durchzuführen.

Das Projekt **Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner** [14] soll wichtige Beiträge zur Optimierung der mageren Vormischverbrennung für stationäre Gasturbinen liefern. Ziel ist die Weiterentwicklung des am LTNT vorhandenen instationären Flamelet-Modells, um den für Gasturbinen interessanten Bereich zwischen Diffusions- und teilvorgemischter Verbrennung besser zu simulieren und es als Entwicklungstool für den Industriepartner *Alstom Power* auszugestalten. Am Flameletmodell sind verschiedene Verbesserungen durchgeführt worden. Es wurde in ein neues CFD-Paket integriert, um mit unstrukturierten Gittern zu arbeiten. Mit einem neuen Ansatz soll die turbulente Zeitkonstante des Modells besser berechnet werden. Die Validierung des Modells ist in Vorbereitung und für 2005 ist ein halbjähriger Aufenthalt eines Doktoranden bei *Alstom Power* geplant, um das Modell dort zu implementieren. Die gewonnenen Erkenntnisse werden direkt in die Entwicklung der nächsten Generation von schadstoffarmen Gasturbinen einfließen.

Im Projekt **Partial Catalytic Oxidation of CH₄ to Synthesis Gas for Power Generation Application** [15] wird den Entwicklungstrends nachgegangen, mittels neuer Brennverfahren noch geringere Emissionen ($\text{NO}_x < 10\text{ppm}$) und höhere Wirkungsgrade ($\eta > 60\%$) zu erreichen. Vielversprechende Alternativen stellen katalytisch unterstützte Verbrennungsverfahren dar, die auf grundsätzlich neuen Brennstoff-Umwandlungsverfahren basieren. Die partielle katalytische Oxidation von CH₄ zu Synthesegas (CO und H₂) wurde experimentell und numerisch untersucht. In einem optisch zugänglichen Reaktor [41] sind die durch Abgasrückführung (AGR) stark verdünnten Gemische (bis zu 60% H₂O und 40% CO₂ vol.) bei 4 bis 10 bar über einem Rh/ZrO₂ Katalysator umgesetzt worden. Die Experimente beinhalteten in situ Raman Messungen der Konzentrationen der Hauptspezies zur Untersuchung der heterogenen Prozesse sowie planare Messungen mit Laser Induzierter Fluoreszenz von Formaldehyd (CH₂O) zur Bestimmung der Gasphasen-Verbrennung. Sowohl die Raman-Messungen als auch die numerischen Berechnungen haben die Bedeutung des heterogen katalysierten Steamreformings von

Methan belegt. Es erhöht die Wasserstoff-Selektivität und die Synthesegas-Ausbeute. Darüber hinaus haben die LIF Experimente deutlich den Einfluss der Gasphase bei höherem Druck belegt, trotz der hemmenden Wirkung der grossen Wasserdampf-Verdünnung. Zusätzliche Experimente wurden in einem kleinmassstäbigen Honigwaben-Katalysator (Fig. 6) mit der gleichen Rh/ZrO₂ Beschichtung wie im optisch zugänglichen Reaktor durchgeführt.

Eine Auswahl verschiedener Rhodium basierter Katalysatoren wurde bei grosser AGR auf Eignung getestet. Als am besten für partielle katalytische Oxidation geeignet haben sich Rh/ZrO₂ und Rh/Ce-ZrO₂ herausgestellt. Mit diesen Katalysatoren wurden Wasserstoffausbeuten von bis zu 35% vol. und Zündtemperaturen von bis auf 655° K hinunter mit CH₄/O₂/H₂O/CO₂ Gemischen erreicht. Mit dieser Fachkompetenz nimmt das PSI zusammen mit 10 europäischen Partnern am **EU-Projekt Advanced Zero Emission Power** teil.



Figur 6: Für PCO Experimente verwendete Honigwaben strukturierte FeCr-Legierung

Im Projekt **Umwandlungseffizienz von Brennstoffzellen und Verbrennungskraftmaschinen für die stationäre, dezentrale Energieversorgung** [16] ist eine Literaturrecherche zu verschiedenen Typen von Brennstoffzellen aufgrund neuester publizierter Daten und Konferenzen durchgeführt und mit sowohl mit berechneten Werten als auch mit Erfahrungswerten für Verbrennungskraftmaschinen verglichen worden. Berücksichtigt wurden einerseits stationäre Anlagen zur kombinierten Strom-/Wärmeerzeugung und andererseits instationäre PKW-Antriebe (wobei bei verbrennungsmotorischen Antriebssträngen auch Hybridkonzepte einbezogen wurden). Die Studie soll Anfang 2005 mit Angaben zu Bauvolumen, Gewicht und Kosten (soweit verfügbar) ergänzt und abgeschlossen werden.

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

In den beschriebenen Projekten haben die Forscher und ihre Kooperationspartner sehr gute Arbeit geleistet und ihre Fachkompetenz national wie auch international unter Beweis gestellt. Die Qualität und Kontinuität in den Projekten konnte wie bisher aufrechterhalten werden. Dank erfolgreich eingereicherter KTI- und EU-Projekte konnte der verfügte Stopp für neue P+D-Projekte teilweise aufgefangen und die Umsetzung der Forschungsergebnisse mit Partnern aus der Industrie gewährleistet werden. Generell kann festgestellt werden, dass sich die Investitionen der letzten fünfzehn Jahren in die Grundlagenforschung gelohnt haben. Die Verbrennungsmodellierung genießt heute in der Privatwirtschaft eine viel stärkere Akzeptanz und wird vermehrt als modernes und kostensenkendes Werkzeug in der Entwicklung verbesserter Technologien von Industriepartnern eingesetzt.

Die Früchte der langjährigen, BFE-unterstützten Forschung über die Harnstoff-Entstickung der Dieselmotorenabgase am PSI können heute genannt werden: Die Ergebnisse des abgeschlossenen Projekts ***NO_x-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR*** [17] sind erfolgreich demonstriert und topaktuell. Die SCR-Methode ist heute in der Umsetzungsphase bei den grossen Dieselmotorenanbietern. Die Zusammenarbeit des PSI mit dem IMRT der ETH-Zürich wurde unter dem Titel *Mobil-SCR* in einer MTW-Sendung präsentiert. Die Crew hat sich damit auch um den *Swiss Technology Award 2005* beworben.

Erfreulich ist die internationale Akzeptanz der Schweizer Forschungsbeiträge. Von acht eingereichten Beiträgen [32 - 39] für das alle 2 Jahre stattfindende *Combustion Symposium* wurden vom *Scientific Committee* deren vier als mündliche Vorträge akzeptiert und die andern in die Poster Session verwiesen.

Der langjährige Prozess, die Fachhochschulen untereinander und mit den Aktivitäten der Hochschul-Institute zu vernetzen, hat im Berichtsjahr zaghafte Fortschritte gemacht. Um die Chancen einer Vernetzung zu erhöhen, sollte der bisher vierte Bereich der Fachhochschul-Institute vergrössert und auf verbrennungsrelevante Material- oder Komponentenforschung ausgedehnt werden.

Da im Frühjahr 2004 für das ganze Amt ein Stopp aller Updates im Internet verfügt wurde, musste der geplante neue Internetauftritt des Programms *Verbrennung* unter www.energie-schweiz.ch eingefroren und auf das Jahr 2005 verschoben werden.

Das Programm *Verbrennung 2004 – 2007* wurde der CORE vorgestellt und von der Kommission zur Ausführung freigegeben. Im Jahr 2005 wird es umgesetzt und der Fokus auf folgende Punkte gelegt:

- Neue BFE-Programmstruktur mit neuen persönlichen Verantwortungsbereichen.
- Ausarbeiten von Perspektiven ab Mitte 2006.
- Verbesserte Integration der Fachhochschulen ins Programm.
- Realisierung der Webseite des Programms Feuerung und Verbrennung im BFE-Internet.
- Die gut abgestimmte Förderung von BFE, KTI und Industrie [20 – 23] soll weiterhin verstärkt werden.
- Generell sollte sich bei knapper werdenden BFE-Mitteln der ETH-Bereich stärker engagieren.
- Die Verstromung biogener Gase mit dem *Swiss-Gas-Motor* ist näher zu untersuchen (der am LAV in Zusammenarbeit mit den Firmen *MENAG/DIMAG* und *LIEBHERR* entwickelte *Swiss-Gas-Motor* wurde neu von *MENAG* für den amerikanischen Markt an die Firma *DTE* lizenziert).

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

- [1] T. Gerber et al., (thomas.gerber@psi.ch) PSI-Villigen: **Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion** (JB).
- [2] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et. al. PSI-Villigen: **Quantitative Laser Induced Fluorescence in Combustion** (JB).
- [3] R. Jeltsch (rolf.jeltsch@ethz.ch) et al., SAM/ETH-Zürich: **Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung** (JB).
- [4] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Direkte numerische Simulation der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen** (JB).
- [5] I. V. Karlin (karlin@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Lattice Boltzmann Simulationsmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich** (JB).
- [6] T. Gerber (thomas.gerber@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Investigation of Spray combustion in Constant Volume Combustion Cell** (SB).
- [7] 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).
- [8] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** (JB).
- [9] G. Barroso und K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch) et al., LAV/ETH-Zürich: **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse** (JB).

Liste der P+D-Projekte

- [10] S. Kunte (stefan.kunte@psi.ch) et al., LAV/ETH-Zürich: **Demonstration eines optischen Sensors zur Unterstützung der Entwicklung von schadstoffarmen motorischen Verbrennungssystemen** (JB).
- [11] P. Griebel (peter.griebel@psi.ch), PSI-Villigen: **Struktur- und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruckflammen** (JB).
- [12] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emmissionsvorschriften bei niedrigem CO₂-Ausstoss** (JB).
- [13] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Massnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** (JB).
- [14] J. Gass (juerg.gass@ethz.ch) et al. LTNT/ETH-Zürich: **Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner**.
- [15] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Partial Catalytic Oxidation of CH₄ to Synthesis Gas for Power Generation Application** (JB).
- [16] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Umwandlungseffizienz von Brennstoffzellen und Verbrennungskraftmaschinen für die stationäre, dezentrale Energieversorgung** (JB).
- [17] M. Koebel (manfred.koebel@psi.ch), PSI-Villigen: **NO_x-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR** (SB2003).
- [18] K. Hermann (hermann@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **HERCULES Advanced combustion concepts, Test facility: Spray/Combustion chamber** (JB).
- [19] R. Bunge (rainer.bunge@hsw.ch), HSR-Rapperswil: **Adaptation eines DeNO_x-Systems auf verschiedene Fahrzeuge** (SB).
- [20] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Modellierung und Auslegung eines CO₂ und NO_x freien Brenners für Alstom Power Gasturbinen**.
- [21] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brennern**.
- [22] J. Czerwinski, (jan.czerwinski@hta-bi.bfh.ch), HTA Biel: **Grundlagen der H₂-Reformat-zumischung am Ottomotor**.
- [23] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Industrietaugliche Lichtwellenleiter-Messkette zur Bestimmung der Russmenge, der Russtemperatur und des Zündverzugs im Verbrennungsmotor**.
- [24] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Simulationswerkzeuge für die Optimierung der Brennverfahrensentwicklung bei Grossdieselmotoren**.
- [25] U. Vogt (ulrich.vogt@empa.ch), EMPA- Dübendorf **Schaumkeramik für neuartige keramische Porenbrenner**
- [26] P. von Böckh (p.vonboeckh@fhbb.ch), FHBB, Basel: **CATVAP-Burner**.

Referenzen

Bei Bedarf können die Referenzen beim Programmleiter bezogen werden.

- [27] Andreas Wasler et. al., **Untersuchung ultraschneller Moleküldynamiken in verbrennungsrelevanten Molekülen mit zeitaufgelösten nicht linearen Raman Messungen.**
- [28] M. Meisinger et. al., **Characterization of Vibrationally and Rotationally Excited Molecules by Two-Color Resonant Four-Wave Mixing.**
- [29] R. Barlow et. al., Proc. Comb. Inst. 27:1087
- [30] Tagungsunterlage, SVV-Tagung vom 1. Oktober 2004.
- [31] G. B. Dummond, Ed.: XXVI Task-Leaders-Meeting, Proc. IEA-Conf. Helsinki, August 2004.
- [32] A. Ciani et. al.: **Studies of Structure and Stability of Planar Diffusion and Toroidal Edge Flames in an Opposed Jet Burner.** Proc. Int. Symposium on Comb.. 2004.
- [33] C. Frouzakis et. al., **Three-dimensional simulation of cellular jet diffusion flames,** Proc. Comb. Inst., 185-192, (2005).
- [34] K. Herrmann et. al., **Nitric oxide detection in turbulent premixed methane/air flame,** Proc. Int. Symposium on Comb, 30, 1517-1525, (2005).
- [35] M. Reinke et. al., **Homogeneous ignition of CH₄/air and H₂O- and CO₂-diluted CH₄/O₂ mixtures over platinum; an experimental and numerical investigation at pressures up to 16 bar,** Proc. Int. Symposium on Combustion 2004.
- [36] Ch. Appel et. al: **Partial catalytic oxidation of methane to synthesis gas over rhodium: in situ Raman experiments and detailed simulations.** Proc. Int. Symposium on Combustion, 2004.
- [37] M. Neracher et. al.: **Heterodyne-Detected Electrostrictive Laser-Induced Gratings for Flow Velocity and Temperature Measurements,** Proc. Int. Symposium on Comb. 2004.
- [38] P. Siewert et. al: **Characteristics of Turbulent, High-Pressure, Lean Premixed Methane/Air Flames.** Proc. Int. Symposium on Combustion, 2004.
- [39] W. Hubschmid et. al.: **Oscillating Flame in a Gas Turbine Burner Observed by Phase-Locked OH Laser-Induced Fluorescence and Chemiluminescence.** Proc. Int. Symposium on Combustion, 2004.
- [40] A. Mayer, TTM (ttm.a.mayer@bluewin.ch), Ed., Proc. **8th ETH-Conference on Combustion generated Nanoparticles,** August 2004
- [41] M. Reinke et. al., *Combustion and Flame* 136 (2004) 217-240.
- [42] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007,** www.energie-schweiz.ch/internet/03095/index.html?lang=de
- [44] A. Hintermann: **Forschungsprogramm Feuerung und Verbrennung 2004-2007.**

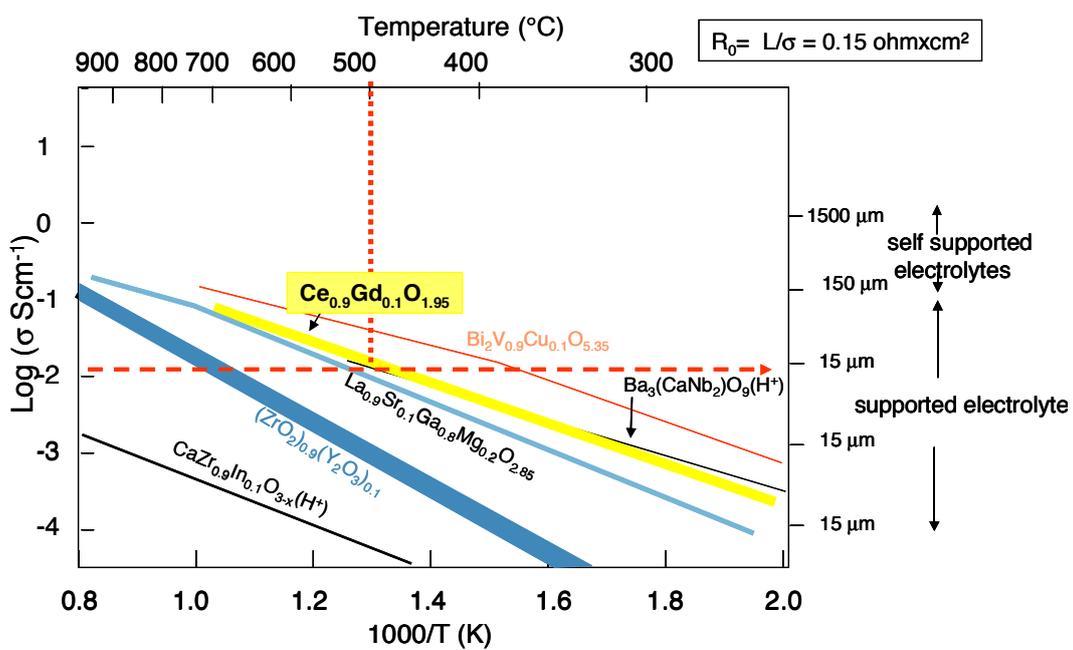
BRENNSTOFFZELLEN

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Alphons Hintermann

alphons.hintermann@bfe.admin.ch

Can we operate a SOFC at 500 C?



Vernetzt zu zukunftsorientierten Lösungen

Im Verbundprojekt *OneBat* nehmen sechs Forschungsstätten die Herausforderung an, die Grundlagen für eine Mikro-SOFC für Handys zu erarbeiten. Materialfragen und Wärmehaushalt sowie die zur Herstellung notwendigen Fertigungstechnologien sind die anzugehenden Hauptprobleme.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Forschungsprogramm **Brennstoffzellen** konzentriert sich auf die Solide Oxide (SOFC)- und Polymer-Elektrolyte (PEM)-Brennstoffzellen-Technologien. In beiden Technologien hat sich in der Schweiz in den letzten fünfzehn Jahren eine beachtliche Fachkompetenz – von den Grundlagen bis hin zum kurz bevorstehenden Markteintritt – etabliert.

Im Berichtsjahr wurde der Fokus der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten PEM-seitig auf die an der FH Biel laufenden Projekte [20, 21, 22] sowie auf die Integration der FH Horw [23] gelegt. Bei den SOFC wurde eine Konsolidierung bei *HTceramix* angestrebt sowie das Vorhaben **One-Bat** [10 – 17] mit dem ambitionierten Ziel **proof of concept of a micro SOFC** massgeblich unterstützt.

Gegen Ende 2004 wurde der CORE das Forschungsprogramm **Brennstoffzellen 2004 – 2007** vorgestellt. Folgende Strategie soll in dieser Zeitperiode gelten:

- Erhaltung der Kontinuität in F+E. Innovation und international anerkannte Qualität soll dabei der Massstab sein.
- Vernetzung national und international (insbes. verstärkte Zusammenarbeit mit der EU).
- Modellierung und Experiment gezielt national und international fördern.
- Demonstration von marktfähigen Nischenprodukten.
- Unterstützung der Technologietransfers in die Privatwirtschaft.
- Verbesserung der Kommunikation (Tagungen).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

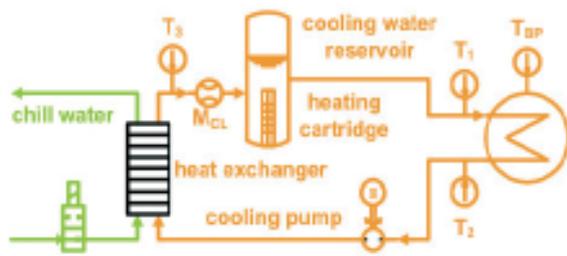
WASSERSTOFF- UND METHANOL-PEM-BRENNSTOFFZELLEN

Mit der Entwicklung verbesserter und kostengünstigerer Materialien für die PEM-Brennstoffzelle, z.B. von Elektroden, Membranen, leistet das PSI im Projekt **Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H₂ oder Methanol als Brennstoff** [1] Grundlagenforschung zur Effizienzsteigerung und zur Kostensenkung dieser Technologie. Weitere Schwerpunkte sind die Entwicklung von *in situ*-Diagnosemethoden und die Adaptation bestehender Methoden für Brennstoffzellen technischer Grösse. So wurde 2004 die Methode der Neutronenradiographie verfeinert, indem der Nachweis von Wasser in der Gasdiffusionsschicht der Kathode nun mit der lokal auftretenden Stromdichte korreliert werden konnte. Bei der Präparation von Membran-Elektroden-Einheiten, basierend auf strahlengefropften Membranen, konnten dank neuer kommerzieller Elektroden die Leistungsdaten der Zellen noch einmal gesteigert werden. Ebenso wurde die Methode der elektrochemischen Wechselstrom-Impedanzspektroskopie weiterentwickelt. Nun können synchron Spektren an verschiedenen Segmenten aufgenommen und dadurch Heterogenitäten in der Stromverteilung visualisiert werden. Versuche zur Einführung einer pseudo Referenzelektrode in PEM-Brennstoffzellen waren erfolgreich und erlauben heute die Bestimmung der Anodenimpedanz und deren Modellierung. Neben PSI-internen Projekten laufen am PSI auch Projekte mit ausländischen Hoch-

schul- und Industriepartnern (u. a. mit *Bosch, Dupont, Michelin, Nissan*) [34].

An der EPFL werden im Projekt **Control System Oriented Dynamic Modeling of FC Systems** [2] Programme zur Simulation des dynamischen Verhaltens von Brennstoffzellen-Systemen erarbeitet. Projektziel ist das Herausfinden und Modellieren des charakteristischen dynamischen Verhaltens eines Brennstoffzellensystems. Mit der Modellierung der Charakteristiken sowohl der Zellenkomponenten als auch der Peripheriegeräte sollen effiziente Regelstrategien für das Gesamtsystem entwickelt werden. Im Berichtsjahr konzentrierten sich die Arbeiten auf die Modellierung der Brennstoffzelle, des kompletten Luftkreislaufsystems, der Kühlung und des Wärmetauschers. Ferner wurde der Wasserstoffkreislauf neu so modelliert (Fig. 1), dass er mit dem implementierten Regelsystem kompatibel ist. Ein einfaches Makromodell, das global die Phänomene des Wasser- und Reaktionsgastransports innerhalb der Brennstoffzelle beschreibt, wurde erarbeitet. Die experimentelle Validierung und die Anpassungen der Modellparameter an diejenigen der Hilfsaggregate wurden ebenfalls durchgeführt.

Ziel des Projekts **Novel Concepts for High-Performance Polymer Electrolyte Fuel Cells** [3] ist die dreidimensionale mathematische Beschreibung der Transportvorgänge und Gasversorgung in PEM-Brennstoffzellen. Dazu wurde an der ETH ein komplexes Modell entwickelt, um die mehr-



Figur 1: Schema des Wärmehaushaltssystems einer Brennstoffzelle

phasigen Transportphänomene in der Diffusionszone einer PEM-Brennstoffzelle zu beschreiben. Die Effekte der Verkleinerung der Stromkollektor-Rippe und der Dicke der Diffusionsschicht auf die Leistungsdaten der PEM-Zelle konnten systematisch untersucht und optimale Zellgeometrien gefunden werden. Mit diesem Modell gelang der Nachweis, dass gewisse Mikrokanalstrukturen zusammen mit sehr dünnen Diffusionsschichten zu höheren Stromdichten führen als konventionelle Kanalbreiten im Millimeterbereich. Drei Netzwerkkanalsysteme wurden analytisch und numerisch untersucht. Aufgrund ihres intrinsischen Vorteils bezüglich Massentransfer und Druckabfall sind sie vielversprechender als traditionelle Systeme. Die numerischen Resultate sind Gegenstand experimenteller Verifikationsarbeiten am PSI.

Das PSI entwickelt zusammen mit der Zürcher Hochschule Winterthur im Projekt **Numerische Modellierung von PEM-Brennstoffzellen** [4] einfache numerische Modelle zur Berechnung von Stromdichte-, Partialdruck- und Temperaturverteilung in technischen Zellen. Der Wasserhaushalt ist einer der wichtigsten Parameter. Die beiden gegenläufigen Prozesse: das Austrocknen der Membran beim Betrieb mit zu trockenem Oxidationsmittel (Luft oder Sauerstoff), versus das Fluten der porösen Schicht und/oder des Flussfeldes mit dem Oxidationsprodukt Wasser reduzieren den Wirkungsgrad heutiger PEM-Zellen. Es existiert meist nur ein schmaler Parameterbereich für einen effizienten Betrieb, welcher zudem empfindlich auf äussere Einflüsse, wie Laständerungen, Temperaturvariationen, etc. reagiert und die Regelung von Stapeln aufwändig macht. Um ein besseres Verständnis dieses Teilprozesses zu erreichen, wurde ein numerisches Modell des Wassertransportes solcher Zellen erarbeitet. Die Wärmegeneration und der -transport wurden in den transversalen 1-D-Ansatz aus dem 1+1-D-Modell von *Freunberger* implementiert. Dieser Ansatz wurde in der F-Umgebung von NMSESES verwendet um die jeweils in 2-D ausgeführten Ebenen der Anode und Kathode zu koppeln, zwischen welchen eine

weitere 2-D-Kühlschicht simuliert werden kann. Dieses Konzept des 2+1-D-Modells erlaubt die Simulation von (technischen) Zellen mit deutlich kleinerem Rechenaufwand als dies mit 3-D-Modellen der Fall ist und öffnet neue Modellmöglichkeiten (Parameterstudien mit technischen Zellen, Mehrzellenstapel).

ERDGAS-SOFC-BRENNSTOFFZELLEN

Im Projekt **Intermediate Temperature Fuel Cells Based on Ceramic Proton Conducting Electrolytes** [5] wird eine neue Generation von Brennstoffzellen erforscht, welche protonenleitende keramische Membranen als Elektrolyten verwenden. Solche Keramiken erlauben einen internen Brennstoffreformierprozess und sollen für Temperaturen zwischen 300° und 700 °C funktionieren. Im Berichtsjahr wurden nach intensiven Literaturstudien eine Übersicht zur Thematik erarbeitet, die Chancen Erfolg versprechender Elektrolyten abgewägt und erste Experimente zur Synthese und Charakterisierung für ausgewählte Protonenleiter durchgeführt. Ebenfalls wurden Pläne für einen Teststand für Leitfähigkeitsmessungen ausgearbeitet.

Ziel des Prozess-Steuerungsprojekts **Production Oriented Process Engineering for Establishing Reliable SOFC Cell and Stack Manufacturing** [6] war, die Automatisierung des in der Firma *HTceramics* entwickelten, kostengünstigen Labor-SOFC-Produktionsprozess (20 Zellen pro Woche mit viel Handarbeit). Eine Pilot-Produktionsanlage für 200 Zellen/Woche sollte aufgebaut und so optimiert werden, dass Produkte mit einheitlicher Qualität hergestellt werden können. Die dazu notwendigen Schritte: (a) Stabilisierung der Prozesse zwecks Verbesserung der Reproduzierbarkeit, (b) Identifizierung der relevanten Kontrollparameter und (c) die Implementierung eines Kontrollprotokolls für alle Teilschritte, konnten dank Beizugs eines erfahrenen Prozessingenieurs realisiert werden. Als kritischer Punkt wurde das Qualitätsmanagement des keramischen Pulvers für die Herstellung der Zellen identifiziert (hierzu müssen die Lieferanten zur Einhaltung gewisser Spezifikationen angehalten werden, damit die Reproduzierbarkeit der Zellen gewährleistet werden kann). Die neue Produktionslinie ist seit Mai 2004 in den neuen Räumlichkeiten von *HTceramix* in *Yverdon* mit einem Output von 45 Zellen/Woche in Betrieb. Anschliessend ist – im Zusammenhang mit einem neuen KTI-Projekt [26] – die Produktionsanlage weiter optimiert und verbessert worden. Das Ziel von 200 Zellen/Woche ist erreicht worden. Als Pulverlieferantin ist die EMPA ebenfalls in das Projekt involviert.

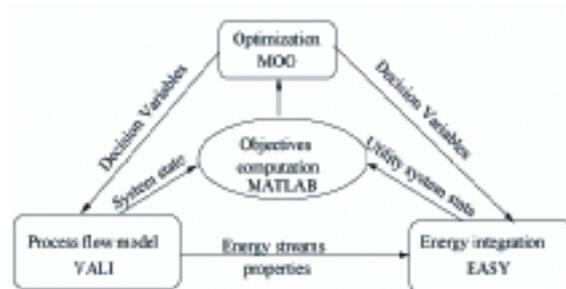
Im Projekt **Transient Response and Degradation Behaviour in Novel SOFC Short Stacks** [7] untersucht die ETH-Lausanne das dynamische Verhalten und das Langzeitverhalten von SOFC-Stapeln sowie von verwendeten Materialien. Um dieses Ziel zu erreichen und um das transiente Verhalten besser zu studieren, wurde ein Modell für eine aktuelle Repeatelement-Konfiguration entwickelt und teilweise validiert. Es wurde auf andere Repeat-Element-Konfigurationen ausgeweitet und eine Methode zur Optimierung des Repeat-Element-Designs demonstriert. Experimentell wurde das Testen von Interkonnektmaterialien unter Oxidierungsbedingungen (800° C und Luft) fortgesetzt. Die besten Materialien sind nun in einen Stack integriert sowie für *Repeat-Element-Testing* im Einsatz. Langzeit-Tests mit über 5000 Stunden sind durchgeführt und kritische Schwachstellen bei verschiedenen Betriebspunkten des Stapels näher untersucht worden. Im Teillastbereich konnten beobachtete Degradationen mit der Reoxidation der Anode im Bereich der Ecken der Zelle in Zusammenhang gebracht werden (Fig. 2). Solche Beobachtungen sollen auch in der Modellierung berücksichtigt werden.



Figur 2: Lokale Reoxidationszone in der Ecke einer Zelle

Im nun abgeschlossenen Projekt **Energy Integration and System Modelling of Fuel Cell Systems** [8] wurden die Ziele, die Energieflüsse in PEM-Brennstoffzellen zu charakterisieren und die totalen Kosten des ganzen Brennstoffzellensystems zu erfassen und zu optimieren, erreicht und auf ein hybrides PEM-Brennstoffzellensystem angewendet. Die Daten sind mit einem *Multi-Objective-Optimizer*-Programm optimiert (Fig. 3)

worden. Dabei wurden die Brennstoffprozesse vor der Brennstoffzelle, im Brennstoffzellenstapel und nach dem Stapel thermodynamisch charakterisiert, die elektrischen, mechanischen und thermischen Flüsse bestimmt und die Kosten der Teilsysteme sowie des ganzen Systems abgeschätzt. Das Programm ist generisch ausgelegt und kann auch für die Analyse anderer Energiekonversionssysteme angewendet werden, falls die dazu notwendigen thermo-ökonomischen Daten vorhanden sind.



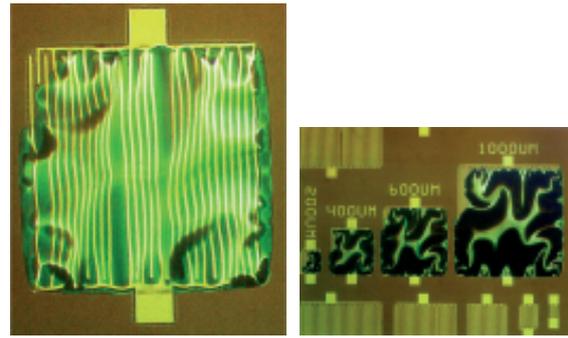
Figur 3: Schema der Verknüpfungen zwischen den verwendeten Softwarepaketen

Im Folgeprojekt **Multi-objective Thermo-Economic Methodology for the Design of Fuel Cell Systems** [9] soll die Software weiter optimiert und mit vorhandenen Daten über SOFC zusätzlich validiert werden. Die thermo-ökonomische Optimierung, Vergleiche verschiedener Brennstoff- und Konversionssysteme für SOFC sollen ebenfalls beschrieben werden können. Ein weiteres Ziel ist es, dieses Modell so auszugestalten, dass es auch bei Ungewissheiten in den Parametern Entscheidungsgrundlagen bietet, wie sie beispielsweise beim Einsatz von Biogas oder Methanol auftreten.

Unter dem Arbeitstitel **OneBat** lancierte die ETH-Zürich ein interdisziplinäres Verbund-Projekt, in dem heute die Fachkompetenzen von sechs Hoch- und Fachhochschul-Instituten vernetzt sind. Ziel ist das Aufzeigen der grundsätzlichen Machbarkeit einer Mikro-SOFC. Dabei geht es um die Identifizierung, die Quantifizierung und die Bewertung der auftretenden Probleme, inklusive Erarbeiten von gangbaren Wegen zu deren Behebung. Weltweit wird hart an Lösungen gearbeitet. Die Ende 2003 gestarteten fünf Projekte, **Battery Replacement Using Fuel Cell Hybrid System** [10], **Efficient Reforming** [11], **Thin Film Electrolyte Membrane** [12], **Pre-Design Study** [13] und **Effiziente numerische Modelle** [14] dienten der Vorfinanzierung eines noch zu genehmigenden KTI-Discovery-Projekts, welches

den *Proof of Concept* einer Mikro-SOFC visiert. Infolge verschiedener Verzögerungen in der Projektgenehmigung hat sich das BFE zu einer zweiten Zwischenfinanzierung entschlossen und für die Projektpartner NTB, ZHW und EPFL drei halbjährige Projekte [15, 16, 17] genehmigt. Erste Arbeiten über die grundsätzliche Machbarkeit einer Mikro-SOFC und Tests hinsichtlich der Herstellung von Dünnschichten auf geeigneten Substraten sind in der Folge durchgeführt worden und ermutigende Resultate liegen vor (Fig. 4 und Titelbild).

Nicht nur die KTI, auch der SNF beteiligt sich mit verschiedenen Projekten [32, 33] an den Grundlagen der Brennstoffzellen-Technologie.



Figur 4: Erste CGO-Membrane mit Elektroden, stabil bis 350 °C

Nationale Zusammenarbeit

Gemäss Projekt **Realisierungstribüne Brennstoffzelle** [30] haben in der Schweiz Aktivitäten an 15 verschiedenen Standorten (davon 4 privatwirtschaftliche) mit total 120 involvierten Fachkräften (Professoren, Doktoranden, Ingenieure, Techniker und Hilfspersonal) stattgefunden. Wie in den einzelnen Projekten beschrieben bestehen enge Zusammenarbeiten und gemeinsame Projekte.

Die Resultate des Projekts [30] wurden anlässlich des **Impulstags Brennstoffzellen** [35] vom 12. November 2004 in Biel den rund hundert Teilnehmern aus Akademie und Privatwirtschaft vorgestellt. Mit insgesamt 15 Vorträgen zu aktuellen Schweizer Projekten wurde eine gute Übersicht des Programms Brennstoffzellen geboten. Insbesondere stellten die zwei Vertreter der Firma **CEKA** in Wattwil ihre Ideen vor, wie sie eine Fertigungsstrasse für 100 PEM-Stacks (Bieler-Technologie) in ihrem Betrieb realisieren könnten. Zu besichtigen waren auch einzelne Produkte, insbesondere das in Biel bestückte Brennstoffzellenfahrzeug **SAM**, das **PSI/ETHZ-PowerPac** und die luftgekühlte Bieler 50-W-Brennstoffzelle.

In Birsfelden wird durch die **AEB Alternativ-Energie Birsfelden AG** (lokaler privater Fernwärmever-

sorger) seit Mitte 2000 eine stationäre **200 kW_{el} Brennstoffzelle vom Typ ONSI PC 25 C (PAFC)** erfolgreich betrieben. Bis Ende 2004 wurden 32'000 Betriebsstunden erreicht. Der elektrische Wirkungsgrad (berechnet aus der netto nutzbaren Strommenge über der eingesetzten Erdgasmenge) betrug gemittelt über die gesamte Betriebsdauer 39.4%. Die Nutzung der Abwärme ist insgesamt noch ungenügend. Verantwortlich dafür ist vorab die Konzeption der Wärmeauskoppelung durch den Hersteller der Anlage in den USA. Die vor allem im europäischen Markt geforderte Optimierung der Abwärmenutzung wird noch zu wenig beachtet. Die Wartung und Instandhaltung der Anlage kann weitgehend durch die lokal beauftragte Service Firma erledigt werden. Störungen werden vor allem durch periphere Systeme des Dampfreformers (Pumpen, Ventile) verursacht. Der Schwefel im Odorierungsstoff des Erdgases beeinträchtigt die Lebensdauer der Anlage. Die Installation der PAFC auf einem Schulhof bezweckte eine publikumswirksame Demonstration der Brennstoffzellentechnologie.

Internationale Zusammenarbeit

Seit Ende 2003 ist die Schweiz offizielles Mitglied der konsultativen **Mirror Group** der **Hydrogen/Fuel Cell Technology Platform** der europäischen Kommission in Brüssel. Weitere EU-Gremien (Strategic Research Agenda, ERA-Net HY-CO, FCTESTNET,...) sind äusserst aktiv und rapportieren der Mirror Group. Diese Teilnahme ist deshalb wichtig, weil die Schweiz kann nicht in

all diesen Unter-Gremien mitmachen kann. Dort können wir die Chance wahrnehmen, unsere eigenen Ideen und Schwerpunkte für die laufenden und kommenden Forschungsprogramme der EU einzubringen. Derzeit macht die Schweiz in den beiden Projekten **Network of Excellence SOFC-NET** (5. Rahmenprogramm) und **Real SOFC** [27] (*Integrated Project*) mit. Weitere Anstrengungen

sind notwendig, um mehr Rückfluss unserer nach Brüssel gezahlten Forschungsgelder zu erhalten. Die Schweiz hat auch bei der Organisation der EU-Sommerschule über die SOFC-Technologie vom 5. – 11. 9. 2004 in Patras mitgeholfen.

Das **IEA-Implementing Agreements Advanced Fuel Cells** koordiniert – mit Schweizer Teilnahme – drei technologie- und zwei anwendungsorientierte Projekte, die alle neu ausgerichtet worden sind. Die Schweiz könnte ihre Kompetenzen noch mehr einbringen [36], hält sich jedoch aus Kosten/Nutzen-Überlegungen zurück.

Im **IEA Projekt Stationäre Brennstoffzellen** wurde der Teil **Demonstration und Implementierung** abgeschlossen. Experten aus 11 verschiedenen Ländern brachten ihre Erfahrungen ein. Der Markteinstieg von kleinen Brennstoffzellen (bis 10 kW) für Einfamilienhäuser wird wegen den starken Schwankungen des Stromleistungsbedarfs als schwierig beurteilt. Ein uneingeschränkter Anschluss ans lokale Stromnetz ist Voraussetzung. Die Integration von vielen kleinen, dezentralen Stromproduktionseinheiten ins Stromnetz erfordert neue technische und organisatorische Lösungen, welche zusätzliche Hindernisse sind. Günstiger bewertet wird der Einsatz von Brennstoffzellen in grösseren Gebäuden mit geringen Stromschwankungen. Vorteile für Brennstoffzellen bieten Gebäude mit einem Verhältnis von Strom zu Wärmebedarf nahe bei 1, was in Minenergie- oder Passivhäusern der Fall ist. Marktnahe Anwendungen im Leistungsbereich 50 – 1000 kW werden mit PAFC realisiert. Gestoppt wurde die Entwicklung von 250 kW PEFC. Die Erfahrungen mit Feldtestanlagen zeigten bei (zu) geringem Wirkungsgrad eine hohe Komplexität im Aufbau und Probleme mit den peripheren Systemen. Die Erwartungen in die SOFC in diesem Leistungsbereich wurden bisher nicht erfüllt. Die Entwicklung der angekündigte Kombination mit Gasturbinen hat sich verzögert, wird jedoch von einer zunehmenden Anzahl Unternehmen und grosser staatlicher Finanzhilfe (vor allem in den USA) vorangetrieben. Ein neu geschaffenes IEA-Projekt hat das Erkennen der Voraussetzungen für eine erfolgreiche Markteinführung stationärer Brennstoffzellen zum Ziel. Die Schweiz leitet den Projektteil **Marktaussichten für stationäre Brennstoffzellen** [37].

Die belgische Firma *Umicore* als Projektpartner der FH-Biel [20] zeigt Interesse am Brennstoffzellenfahrzeug *SAM*. Daher konnte das Fahrzeug bereits auf dem Stand der *Umicore* an der Hannovermesse 2004 der internationalen Öffentlichkeit vorgestellt werden.

An der internationalen Konferenz **FUEL CELL 2004** vom Juli 2004 in Luzern hatten wiederum über 500 Fachleute aus aller Welt über die Fortschritte in der Brennstoffzellen-Technologie berichtet. Einige BFE-Projekte konnten dort der internationalen Fachwelt vorgestellt werden. Insbesondere stand das Brennstoffzellen-Boot *Hydroxy3000* [18] für Testfahrten zur Verfügung und das Innenleben des *SAM* [20] konnte im Detail studiert und kommentiert werden.

Der Erfahrungsaustausch mit unseren Nachbarländern wird aktiv durch Konferenzen gefördert. So organisierte das BFE am 17./18. März 2004 die erste schweizerisch/deutsche Tagung zum Thema Brennstoffzellen-Modellierung [38], die einem echten Bedürfnis entsprach. Im Dezember 2004 wurde in Belfort der *2nd France-Deutschland Fuel Cell Workshop* mit Schweizer Beteiligung durchgeführt.

Der weltgrösste Wettbewerb für zukunftsweisende Antriebskonzepte *Challenge Bibendum* fand im Oktober 2004 erstmals in China statt. Der *HY-LIGHT* (Fig. 5) wurde dabei erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt und erhielt einen Preis. Die *Michelin*-Gruppe und das *PSI* haben diesen Prototypen eines leichten (850 kg) Personenwagens – aufbauend auf den Erfahrungen des Vorgängerfahrzeugs *HY-POWER* (*VW-Bora* mit Gewicht 1922 kg) – innerhalb von zwanzig Monaten entwickelt. Dank ausgeklügeltem Chassis-Management und der elektrischen Aufhängung fährt der *HY-LIGHT* äusserst stabil und sicher in Kurven und beim Bremsen. Im Dezember übergab das *PSI* den *VW-Bora* dem Verkehrshaus in Luzern als Ausstellungsobjekt.



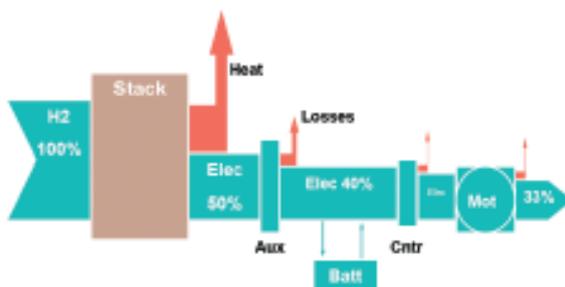
Figur 5 Der *HY-LIGHT* setzt als Zwei-Liter-Auto mit Brennstoffzellenantrieb neue Massstäbe.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

WASSERSTOFF- UND METHANOL-PEM-BRENNSTOFFZELLEN

Seit 1997 realisiert das Institut d'énergie et de systèmes énergétiques der FH-Yverdon Brennstoffzellen betriebene Boote. Im Berichtsjahr wurde im Projekt **Bateau pile à combustible Hydroxy3000 – possibilités et limitations dans l'application des piles à combustible à la navigation** [18] das Boot *Hydroxy3000*, ein Katamaran mit einer 3kW-PEM-Brennstoffzelle, ausgiebig getestet und einem breiten Publikum sowie der Presse vorgestellt. Das Boot wurde von den kantonalen Behörden als Prototyp homologiert und darf seither legal navigieren. Anlässlich des European FC-Forums vom Juli 2004 in Luzern konnten sich rund 150 Teilnehmer auf kurzen Fahrten auf dem Vierwaldstättersee von den Eigenschaften und Vorzügen des Bootes überzeugen lassen. Ihre Reaktionen waren durchwegs positiv. Weitere Aufmerksamkeit erhielt das Boot im November in Lausanne, wo es anlässlich der *Trophée Eco-Consciense 2004* von der Jury durch ein *Certificat d'excellence* ausgezeichnet wurde. Nach rund 200 Betriebsstunden, 80 Navigationsstunden auf dem See und über 100 Startvorgängen konnte bei der Zellenleistung keine nennenswerte Degradation festgestellt werden. Trotzdem ist das Gesamtsystem noch nicht optimiert (Fig. 6). Mit einem neuen Kompressor wird einstweilen der Gesamtwirkungsgrad verbessert und weitere Abstimmungen der Komponenten dürften sich künftig als notwendig erweisen.

Die Fragestellung und das Projekt **Untersuchung des Temperaturverhaltens von PEMFC im Bereich bis -10 °C** [19] wurde dem PSI von einem Schweizer Industriepartner zum *BRESA*-Projekt vorgeschlagen. Sie ist auch für das neue Fahrzeug *Hy-Light* sowie im **Integrated Project „HyTran“** der EU, in dem das PSI im Bereich Stapelentwick-



Figur 6 Energiefluss (vor Auswechslung des Kompressors) im Boot *Hydroxy3000*.

lung engagiert ist, aktuell. Problematisch sind bei Aussentemperaturen unter 0 °C sowohl die Kühlflüssigkeit (meistens Wasser) als auch die wässrige Polymer-Elektrolyt-Membrane. Im Projekt wurden beide Aspekte untersucht und abgeklärt, welche alternativen Kühlflüssigkeiten eingesetzt werden können und ob bei Tieftemperaturzyklen bis -10 °C irreversible Schäden in der Membrane oder der Aktivschicht auftreten. Das Ziel war, die Degradation der Leistung der Membran durch Gefrierzyklen zu untersuchen und Betriebsparameter zu bestimmen, welche eine möglichst geringe Degradation durch die Exposition bei Temperaturen unter 0 °C hervorrufen. Dazu wurden Experimente am Versuchsaufbau (Fig. 7) durchgeführt, an dem die Temperatur von -20 °C bis 80 °C variiert werden kann. Gezeigt wurde, dass der Feuchtigkeitshaushalt der Zelle einen entscheidenden Einfluss auf die Degradation hat. Die auftretenden Probleme wurden sowohl beim Kühlmittel als auch bei den elektrochemischen Komponenten geortet und teilweise analysiert. Weitere Arbeiten zur Frostsicherheit von PEM-Brennstoffzellen sind jedoch noch notwendig und werden Gegenstand künftiger Projekte sein.



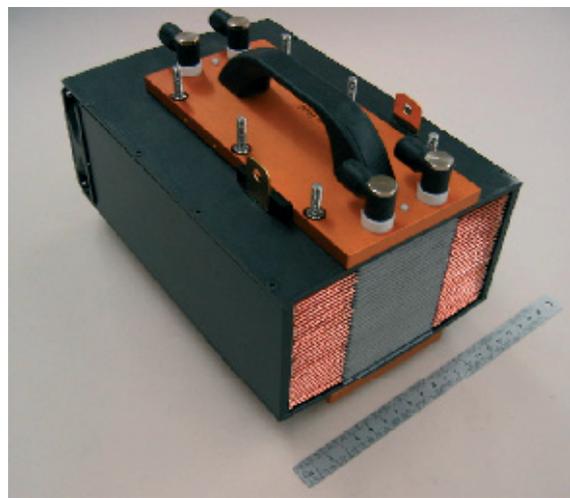
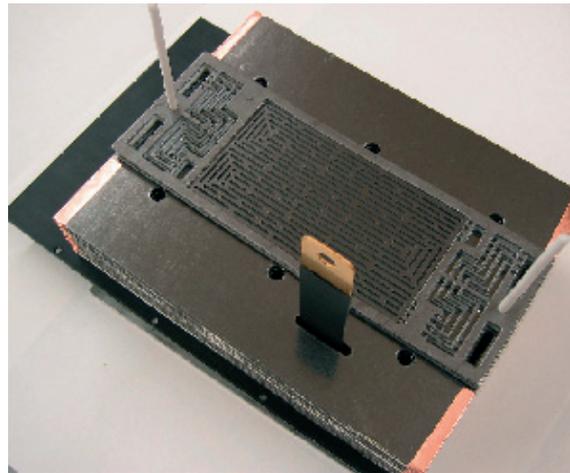
Figur 7 Versuchsaufbau mit gekühlter (-10°C) 200 cm² Zelle

Im Projekt **Brennstoffzellenfahrzeug SAM, Phase I** [20] wurde an der FH-Biel die für das Fahrzeug *SAM* der Firma *CREE* vorgesehene 6 kW-PEM-Brennstoffzelle gebaut. Der *SAM* ist ein Hybridfahrzeug mit Brennstoffzelle und einer Li-Polymer Batterie (35 Ah) für zwei Personen. Das Hybridfahrzeug hat eine maximale Leistung von 15 kW und verfügt mit den beiden eingebauten Metallhydridspeichern, die 400 g Wasserstoff

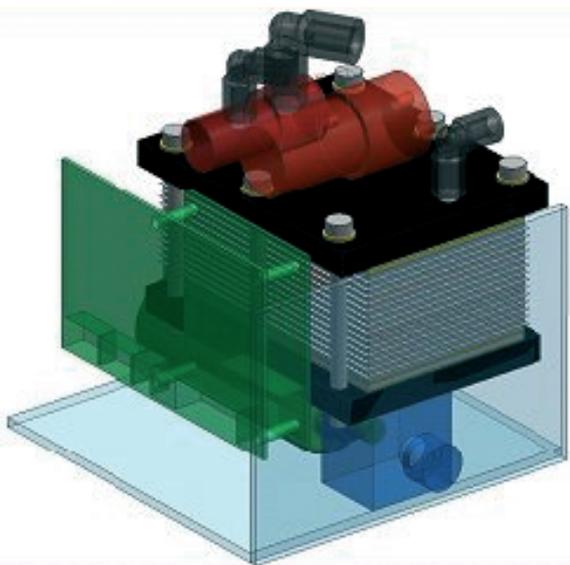
speichern können, über eine Reichweite von 200 km. Der SAM steht heute für Feldtest-Erfahrungen der an der FH Biel mitentwickelten Brennstoffzellentechnologie zur Verfügung.

An der FH Biel wird im Projekt **Entwicklung eines luftgekühlten Brennstoffzellen-Systems** [21] ein neues Konzept erarbeitet, welches verschiedene Vorteile gegenüber bestehenden Systemen aufweist. Kernkomponente wird eine luftgekühlte Brennstoffzelle sein. Sie ist so ausgelegt, dass die einzelnen Zellen zu einem 50-W-, 100-W-, 200-W- und 500-W-Stapel zusammengefasst werden können. Für den modularen Stapel und das Systemkonzept wurden die Anforderungen ermittelt und definiert. Mit Hilfe dieser Anforderungen wurden für das Zelldesign Konzepte erarbeitet und an einigen mittels CAD ausformuliert. Im Jahr 2004 wurden zwei Prototypen gebaut und getestet. Die Leistung des 30-Zellenstapels ist mit 236 W noch nicht bei dem angestrebten Wert von 500 W. Mit dem Stapel werden weitere Untersuchungen durchgeführt, um den Grund der niedrigen Leistung ermitteln zu können. Erste Ergebnisse deuten auf ein Problem im Flussfeld (Bypass im Luftstroms), oder auf ein thermisches Problem der Zelle hin (Fig. 8). Die nächsten Arbeiten werden gezielt diese Problematik untersuchen. Nach Identifizierung des Problems wird die Zelle konstruktiv angepasst, so dass ein neuer Stapel mit 30 Zellen gebaut werden kann. Parallel zur Entwicklung des Brennstoffzellenstapels wurde das System aufgebaut, in welches der 30-Zellenstapel integriert und betrieben wurde. Im Berichtsjahr konnte ein Industriepartner gefunden werden, der bereit ist, in die Technologie zu investieren und eine Produktionslinie für 100 Brennstoffzellen-Stapel aufbauen will.

Die erste Etappe des Projektes **50 W PEM-Brennstoffzelle für mobilen Roboter** [22] ist erreicht, wenn die ohne spezielle Kühlung betriebene aus 12 Zellen bestehende Brennstoffzelle über mehrere Stunden zuverlässig ca. 25 W liefert (Fig. 9). Die Überwachungselektronik der Zellen arbeitet problemlos und schaltet die Last ab, sobald sich an einer Zelle eine zu niedrige Zellspannung einstellt. Der neu entwickelte 6V/24V DC-DC-Wandler arbeitet bis 50 W einwandfrei bei einem Wirkungsgrad um 85%. Das bisher angeeignete Know-how genügt, um Brennstoffzellen nach Kundenwunsch im Bereich von 5 W bis 50 W zu entwerfen und herzustellen. Die Weiterentwicklung führt zu einer Lösung, bei der die Zellen bei einer geregelten Luftfeuchte von 60-70% betrieben werden können. Damit soll die immer wieder auftretende Verstopfung der Gaskanäle durch Prozesswasser verhindert werden.



Figur 8: Flussfeld des Stapels und 30-Zellen Stapel



Figur 9: 50-W-Stapel-System mit Luft- und Gasanschlüssen

Im neu gestarteten Projekt **USV für GSM-Basisstationen mit Brennstoffzellen** [23] kombiniert die FH-Horw Supercaps mit einer USV eines privaten Anbieters (der auch den DC-DC-Wandler liefert) und baut diese mit allen notwendigen Schnittstellen in die an der FH-Horw lokalisierten Mobiltelefon (GSM)-Basisstation von Swisscom Mobile ein. Dies wird Gelegenheit dazu geben, die Schwachstellen der Brennstoffzelle des privaten Anbieters im Detail kennen zu lernen.

ERDGAS-SOFC-BRENNSTOFFZELLEN

In der an der EMPA-Dübendorf durchgeführten **Studie zur Herstellung von gradierten Anodensubstraten für die Festoxidbrennstoffzellen** [24] wurde die Optimierung des Gastransportes in einem SOFC-Anodensubstrat und der elektrochemischen Aktivität in der Anodenschicht mit Hilfe einer gradierten Porosität des Anodensubstrates untersucht. Im Rahmen einer Diplomarbeit und eines Praktikumsprojektes konnte die Porosität von Ni-YSZ-Anodensubstraten durch die Verwendung von Kohlenstoff als Porosiermittel gezielt eingestellt werden. Pressmassen mit unterschiedlichen Porengrößen und Porosität wurden entwickelt und hinsichtlich des Sinterschrumpfens in einem mehrschichtigen Aufbau angepasst. Mehrschichtige Substrate mit gradiertem Porosität sind hergestellt und strukturell charakterisiert worden. Ausgewählte gradierte Substrate wurden durch Schlickerspritzen mit einem Elektrolyt beschichtet und ko-gesintert. Dazu mussten sowohl der Sprühschlicker als auch das Spritzverfahren angepasst werden. Die elektrochemische Charakterisierung der in diesem Projekt entwickelten Zellen zeigt noch deutlichen Entwicklungsbedarf für die Gasdichtigkeit der Elektrolytschicht. Die Leistung der Zellen erreichte 90 mW/cm^2 bei 800°C in Wasserstoff/Sauerstoff. Auch wenn diese Ergebnisse hinsichtlich der Anodensubstrate nicht weiter aussagefähig sind, lässt sich feststellen, dass bei Zellen mit gasdichten Elektrolyten wesentlich höhere Leistungen erwartet werden können. Somit sind sie durchaus vergleichbar mit derzeit bekannten SOFC-Anodensubstraten.

HTceramix startete nach dem Aufbau der Infrastruktur in seinen neuen Lokalen in Yverdon das Projekt **Pilot Manufacturing of Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) stacks** [25]. Ziel ist eine industrielle Anlage für ein neues Design von SOFC-Stacks. Automatisierungsgrad, Reproduzierbarkeit, Qualitätsmanagement und Versorgungslogistik sollen dabei sowohl auf die externe (Industrie) als auch auf die interne Nachfrage (F&E) abgestimmt sein. Heute läuft die Batch-Produktionslinie mit integrierter Prozess- und Qualitätskontrolle. Die Abläu-

fe sind stabilisiert, werden laufend verbessert und erlauben eine reale Kostenanalyse. Dies ist nicht zuletzt dem ergänzenden KTI-Projekt **Upscaling of Low Cost Solid Oxide Fuel Cell Stacks** [26] zu verdanken, bei dem in den ersten neun Monaten klar definierte Meilensteine gesetzt wurden. Nachdem die geforderte Stackleistung von 250 W erreicht und der Vertrag mit einem Systemintegrator unterzeichnet wurde, ist nun das KTI-Projekt auf der Zielgeraden. Die gestellten Zwischenziele bezüglich Produktionskapazität (Fig. 10) sind teilweise übertroffen worden, das Endziel von 200 Zellen/Woche für die Membrane wurde erreicht und die Chancen sind intakt, im Jahr 2005, auch das Endziel für 200 SOFCConnex™ pro Woche zu erreichen. Dank der Vorleistungen des BFE und der KTI konnte sich HTceramix erfolgreich und als willkommener Partner ins EU-Projekt **Real SOFC** [27] einbringen. Sowohl im KTI- als auch im EU-Projekt sind die EMPA und die ETHL massgeblich mitbeteiligt.

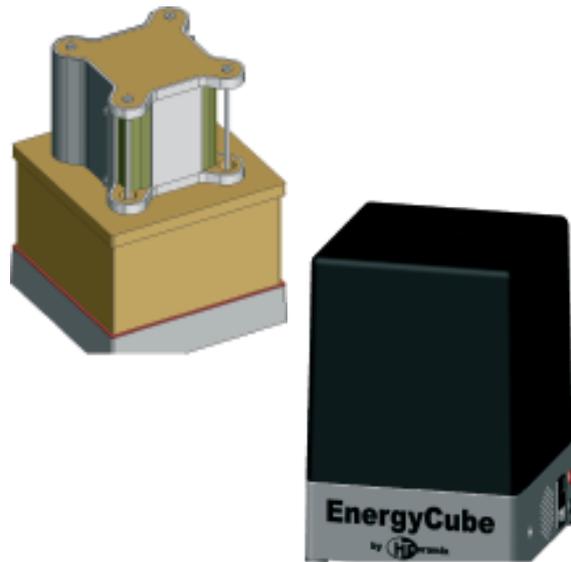


Figur 10: Die computergesteuerte Bandschneidvorrichtung erlaubt die Produktion von Zellen jeglicher Grösse

Im Laufe der letzten Jahre hat sich HTceramix zunehmend mit der Herstellung von SOFC-Zellen, Gasverteilungssystemen und Stromsammlerschichten (SOFCConnex™) befasst und hat daraufhin ein eigenes Stack-Konzept entwickelt. Im Projekt **SOFC Hotbox™ and Demonstrator** [28] wird, basierend auf einem low cost 250-W-Stack, das Konzept einer Hotbox™ erarbeitet und dazu ein Prototyp-Produktionslabor aufgebaut. Die Hotbox™ soll als kompakter, optimal integrierter und monolithischer Wärmetauscher mit einem SOFCConnex™ basierenden Brennstoffzellenstack (Fig. 11) im EnergyCube-Demonstrator dem Kunden als anschlussbereiter, kostengünstiger Stromwandler angeboten werden. Das Vorhaben ist je-

doch noch in der Startphase. Es ist komplementär zum bereits erwähnten KTI-Projekt **Upscaling of Low Cost Solid Oxide Fuel Cell Stacks** [26] und wird auch von dem durch das EU-Projekt **Real SOFC** [27] erwarteten Technologieschub profitieren.

Ziel des KTI-Projekts **Entwicklung von SOFC-Stacks mit Hilfe von Virtual Prototyping Methoden** [29] ist die Weiterentwicklung von SOFC-Stacks der *Sulzer Hexis AG* mit Hilfe von *Finite Element* basierten *Virtual Prototyping*-Methoden. Zur Optimierung des Systemverhaltens sollen Einflussgrößen mit grosser Hebelwirkung identifiziert und gezielt verändert werden. Die notwendigen Sensitivitätsanalysen erfordern hoch aufgelöste numerische Modelle, die eine Entkopplung von thermischen Phänomenen einerseits und von Strömungs- und Konzentrationseffekten andererseits ermöglichen.



Figur 11: HoTbox™ und EnergyCube Demonstrator

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Im Projekt **Realisierungstribüne Brennstoffzelle** [30] ist der momentane Stand der Schweizer-Brennstoffzellen Szene sowohl für die PEM- als auch für die SOFC-Technologie aufgenommen und nach Stärken/Schwächen und Chancen/Risiken analysiert worden. Als Stärken sind die hohe Kompetenz und der Ausbildungsstand der Forschergruppen, ihre gute Kommunikation und Vernetzung untereinander und die grosse Anzahl realisierter Demonstratoren und Pilot-Anwendungen erkannt. Als eindeutige Schwäche wird die starke Zurückhaltung der Industrie und der Investoren beurteilt. Begründet wird dies mit fehlenden Informationen potentieller Zulieferanten und deren Kunden. Zu den zu überwindenden Hindernissen zählen: die ungenügende Transparenz über die Potenziale und Einstiegschancen beider Technologien, fehlende Impulse für Innovationen, wenig praxisorientierte Forschungsthemen, die mangelnde Marktreife der vorhandenen Produkte sowie die rückläufigen Mittel der öffentlichen Hand (insbesondere im Lichte der starken Förderung in den USA, Japan und der EU).

Im PEM- sowie im SOFC-Technologiebereich und auch bei den **internationalen Beziehungen** wurden im Berichtsjahr gute Fortschritte gemacht. Speziell zu erwähnen ist, dass anlässlich des Kongresses der *American Society of Mechanical Engineers* der Doktorand S. M. Senn vom LTNT der ETH-Zürich für seinen eingereichten Artikel [39] den *Best Student Papers Award* erhielt.

Der Vernetzungsgrad zwischen den Instituten ist dank BFE-Projekten erfreulich hoch. Paradebeispiel ist das **OneBat**-Projekt, in dem 6 Institute koordiniert an einem Ziel arbeiten. Hauptproblem ist und bleibt die Gesamtfinanzierung durch die KTI. Obwohl der *OneBat* KTI-Antrag im Sommer 2004 als Discovery-Projekt mit Auflagen bewilligt wurde dürften die KTI-Mittel erst 2005 fliessen, weshalb eine Finanzierungslücke entstanden ist, die infolge Budgetkürzungen beim BFE durch das BFE nicht mehr aufgefangen werden konnte. Das ambitionöse Projekt läuft daher in Gefahr, gegenüber der starken internationalen Konkurrenz in Verzug zu geraten. Zwischen *HTceramix* und den EPFL-Projektnehmern bestehen enge Zusammenarbeiten. Auch die FH-Biel ist als aufstrebendes Brennstoffzellen-Kompetenzzentrum dabei, seine Aktivitäten mit dem PSI, der ETHZ und mit anderen Fachhochschulen zu vernetzen.

Diese Fakten sind auch ins **Brennstoffzellen-Forschungsprogramm 2004 – 2007** [40] eingeflossen, das im November 2004 von der **CORE** genehmigt und zur Ausführung freigegeben wurde. Die CORE ist mit dem Programmleiter einig, dass die Brennstoffzellen-Technologie nicht schon morgen, sondern erst übermorgen auf dem Markt zu haben ist. Allerdings ist die Zeit, gut zu nutzen und es ist – wenn möglich – schon in naher Zukunft in Nischenmärkte einzudringen.

Vernetzung unter den Forschern und Anwendern der Brennstoffzellen-Technologie wird auch

2005 ein wichtiges Thema sein. Obwohl 2004 in Biel [35] sehr erfolgreich durchgeführt, ist für 2005 keine Neuauflage des **Impulstages Brennstoffzellen** geplant. Hingegen wird ein Modellierungsseminar analog dem von Zürich [38] im März 2005 in Stuttgart durchgeführt werden. Zur effizienten Vernetzung ist der Auftritt der Programms **Brennstoffzellen** auf der BFE-Webseite wichtig. Das Projekt **Struktur BFE-Webseite Brennstoffzellen** [31] mit Zielsetzung: Einheit-

licher Web-Auftritt aller BFE-Energieforschungs-Programme, musste infolge des neu geforderten bundesweit einheitlichen Webauftritts zurückgestellt werden. Das Thema wird 2005 wieder aufgenommen.

Infolge drastischer Budgetreduktionen im BFE können 2005 keine grösseren Projekte gestartet werden, was zu kritischen Engpässen und Kontinuitätsunterbrüchen führen wird.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

- [1] G. Scherer et al. (guenther.scherer@psi.ch), PSI, Villigen: **Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H₂ oder Methanol als Brennstoff**, (JB).
- [2] F. Grasser et al. (felix.gasser@epfl.ch), EPF, Lausanne: **Control System Oriented Dynamic Modeling of FC Systems**, (JB).
- [3] S. Senn, D. Poulidakos (stephan.senn@tnt.iet.mavt.ethz.ch), LTNT, ETH-Zürich: **Novel Microstructured Materials for Fuel Cells**, (JB).
- [4] F. Büchi, M. Roos, (felix.buechi@psi.ch), PSI, Villigen, (markus.roos@zhwin.ch) ZHW, CCP, Winterthur: **Numerische Modellierung von PE-Brennstoffzellen mit FE Methode**, (SB).
- [5] P. Holtappels et al. (peter.holtappels@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Intermediate Temperature Fuel Cells based on Ceramic Proton Conducting Electrolytes**, (JB).
- [6] E. Tagliaferri, O. Bucheli (Olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Science Park PSE-A, Lausanne: **Production Oriented Process Engineering for Establishing Reliable SOFC Cell and Stack Manufacturing**, (SB).
- [7] D. Larrin et al. (diego.larrain@epfl.ch), EPF, Lausanne: **Transient response and degradation behaviour in novel SOFC short stacks**, (JB).
- [8] F. Maréchal et al. (Francois.Marechal@epfl.ch) LEN/EPFL, Lausanne: **Energy Integration and System Modelling of Fuel Cell Systems**, (SB).
- [9] F. Maréchal et al. (Francois.Marechal@epfl.ch) LEN/EPFL, Lausanne: **Multi-objectif Thermo-Economic Methodology for the Design of Fuel Cell Systems**, (JB).
- [10] L. Gauckler et al. (ludwig.gauckler@mat.ethz.ch), ETH, Zürich: **Battery Replacement Using Fuel Cell Hybrid System**, (SB).
- [11] D. Poulidakos et al. (dimos.poulidakos@ethz.ch), LTNT, ETH-Zürich: **Efficient Reforming**, (JB)
- [12] P. Murali et al. (paul.murali@epfl.ch) MXD/EPFL-Lausanne: **Thin Film Electrolyte Membrane for Miniaturized Solid Oxid fuel Cells**, (JB).
- [13] P. Müller et al. (ma@ntb.ch) NTB Buchs: **Pre-Design Study**, (JB).
- [14] M. Roos et al. (Markus.roos@zhwin.ch) ZHW, Winterthur: **Effiziente numerische Modelle**, (JB).
- [15] P. Murali et al. (paul.murali@epfl.ch) MXD/EPFL-Lausanne: **ONEBAT – Battery Replacement using miniaturized SOFC, Teil ETH-L**, (JB).
- [16] P. Müller et al. (ma@ntb.ch) NTB Buchs: **ONEBAT – Battery Replacement using miniaturized SOFC, Teil NTB**, (JB).
- [17] M. Roos et al. (Markus.roos@zhwin.ch) ZHW, Winterthur: **ONEBAT – Battery Replacement using miniaturized SOFC, Teil ZHWL**, (JB).

Liste der P+D-Projekte

- [18] J. Affolter (affolter@eivd.ch), EIVD/HES-SO, Yverdon: **Bateau pile à combustible Hydroxy3000 – possibilités et limitations dans l'application des piles à combustible à la navigation**, (JB).
- [19] F. Büchi, (felix.buechi@psi.ch), PSI, Villigen: **Untersuchung des Temperaturverhaltens von PEMFC im Bereich bis -10°C**, (SB).
- [20] T. Lüthi et al. (thomas.luethi@hti.bfh.ch) Hochschule für Technik und Informatik, Biel: **Brennstoffzellenfahrzeug SAM, Phase I** (JB)
- [21] M. Ruge et al. (martin.ruge@hta-bi.bfh.ch), Hochschule für Technik und Informatik, Biel: **Entwicklung eines Luftgekühlten Brennstoffzellen-System**, (JB).

- [22] T. Lüthi et al. (thomas.luethi@hti.bfh.ch) Hochschule für Technik und Informatik, Biel: **50 W PEM-Brennstoffzelle für mobilen Roboter**, (JB).
- [23] U. Trachte (utrachte@hta.fhz.ch), Hochschule für Technik und Architektur, Horw: **USV für GSM-Basisstationen mit Brennstoffzellen**, (JB).
- [24] P. Holtappels et al. (peter.holtappels@empa.ch) EMPA, Dübendorf: **Studie zur Herstellung von graduierten Anoden-substraten für die Festoxidbrennstoffzellen** (SB).
- [25] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramic.ch), HTceramix SA, Science Park PSE-C, Lausanne: **Pilot Manufacturing of Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) stacks**, (JB).
- [26] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramic.ch), HTceramix SA, Science Park PSE-C, Lausanne: **Upscaling of Low Cost Solid Oxide Fuel Cell Stacks**
- [27] P. Holtappels et al. (peter.holtappels@empa.ch) EMPA, Dübendorf: **Real SOFC**
- [28] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramic.ch), HTceramix SA, Science Park PSE-C, Lausanne: **SOFC HoTbox™ and Demonstrator**, (JB).
- [29] M. Roos et al. (Markus.roos@zhwin.ch) ZHW, Winterthur: **Entwicklung von SOFC-Stacks mit Hilfe von Virtual Prototyping Methoden**
- [30] M. Spirig, (temas@temas.ch), Temas AG, 9320 Arbon: **Realisierungstribüne Brennstoffzelle**, (SB).
- [31] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENTZ Basel: **Struktur BFE-Webseite Brennstoffzellen**, (JB).
- [32] J. Van herle, (Jan.Vanherle@epfl.ch), EPF, Lausanne: **Modeling and operation analysis of dense ceramic oxygen separation tubes, used in partial oxidation of natural gases to synthesis gas.**
- [33] D. Favrat, (daniel.favrat@epfl.ch), EPF, Lausanne: **Reactive flow in a high temperature fuel cell element: Numerical modeling and experimental validation.**

Referenzen

- [34] **PSI Annual Report 2004 Electrochemistry Laboratory**, <http://ecl.web.psi.ch>.
- [35] M. Ruge et al. (martin.ruge@hta-bi.bfh.ch), Hochschule für Technik und Informatik, Biel: **CD-Rom Impulstag Brennstoffzellen, Biel, 12. November 2004.**
- [36] A. Hintermann (alphons.hintermann@bfe.admin.ch), **Highlights in the Swiss Fuel Cell R&D Programme 2004**, Report to the IEA ExCo Advanced Fuel Cells, Seoul, October 2004.
- [37] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENTZ Basel: **IEA Task XII Stationäre Brennstoffzellen Demonstration und Markteinführung**, (SB).
- [38] D. Poulidakos, (dimos.poulidakos@ethz.ch), LTNT, ETH-Zürich: **CD-Rom Fuel Cell Research Symposium Modelling and Experimental Validation**, Zürich 17. – 18. März 2004.
- [39] S. M. Senn, D. Poulidakos, (dimos.poulidakos@ethz.ch), ETH-Zürich: **Porous Materials as Fluid Distributors in Polymer Electrolyte Fuel Cells – a computational Performance analysis**, Proc. ASME, in Press.
- [40] A. Hintermann (alphons.hintermann@bfe.admin.ch), BFE, 3003 Bern: **Brennstoffzellen Forschungs- und Umsetzungsprogramm 2004 – 2007**, in Vorbereitung.

VERFAHRENSTECHNISCHE PROZESSE VTP

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Martin Stettler

martin.stettler@bfe.admin.ch



Rektifikationsanlage zur Ethylbenzol-Styrol-Trennung

Abfall-Lösungsmittel können auf zwei Arten wieder verwendet werden: Rückgewinnung durch Destillation, oder Verbrennung. Ein neu erarbeitetes Softwareprogramm erlaubt, die Umwelteinwirkung der Wiederverwendung einer Vielzahl von Lösungsmitteln mittels beider Methoden auf einfache Weise zu bestimmen und zu vergleichen.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Programm *Verfahrenstechnische Prozesse VTP* befasst sich mit den Grundlagen der Optimierung von industriellen, verfahrenstechnischen Prozessen (Prozess-Ketten) und der unmittelbaren Infrastruktur. Industrielle Prozesse wurden bis heute nur punktuell auf Energie-Effizienz und CO₂-Reduktionspotenzial untersucht, respektive optimiert. Untersuchungen der EPFL aus den 80-er Jahren zeigen, dass industrielle Prozesse ein mittleres Energiesparpotenzial von rund 30% aufweisen, welches vor allem in Form von ungenutzter Abwärme vorliegt. Konsequente Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung gehören heute immer noch zu den wichtigsten Massnahmen bei thermischen Prozessen. Mit der Einführung des CO₂-Gesetzes und der drohenden CO₂-Abgabe aber auch durch die deutlich gestiegenen Energiepreise für Öl und Gas, ist das Interesse der Industrie an mehr Energieeffizienz merklich am steigen.

Die Hauptaktivität im Berichtsjahr galt einerseits der Weiterführung und Begleitung der laufenden Forschungsprojekte aber auch der Definition neu-

er Forschungsthemen aus der Industrie. Als zweites wurde ein Programmkonzept 2004-07 mit entsprechenden Programmschwerpunkten und Stossrichtung erarbeitet. Das Konzept basiert auf dem aktuellen Energieforschungsbedarf der energieintensiven Industriezweige. Dabei zeigte sich, dass der Entscheid, die Bedarfsabklärung in erster Linie auf die Zielvereinbarungsgruppen der Energieagentur der Wirtschaft EnAW zu konzentrieren, richtig war. Die energieintensiven Schweizer Unternehmen sind bei der EnAW eingebunden und werden von Moderatoren bei der Planung und Umsetzung der nötigen Energiesparmassnahmen begleitet. Es sind auch diese Unternehmen, welche die nötige Sensibilisierung und auch das nötige Engagement für erfolgreiche Forschungsprojekte mitbringen.

Das Programmkonzept 2004-2007 und eine separate Projektübersicht wird Anfang 2005 auf das Internet aufgeschaltet (www.energie-schweiz.ch, Ratgeber, Angebote Unternehmen, Verfahrenstechnische Prozesse).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

Das Projekt **Analyse und Modellierung des Energiebedarfs in Batch-Prozessen** [1] wurde Anfang 2004 mit dem Schlussbericht abgeschlossen. Eine Umsetzung ist noch verfrüht. Ein Nachfolgeprojekt **Modeling and Optimization of Energy Cosumption in multipurpose Batch Plants** [2] 2004-2007) greift die noch vorhandenen Modell-Schwachstellen des Vorgängerprojekts auf. Anhand eines zusätzlichen Mehrproduktebatchbetriebs der Basler Chemie sollen die vorhandenen Top-down und Bottom-up Modelle, unterstützt durch gezielte Messungen, verbessert werden, damit diese die angestrebte allgemeine Gültigkeit erlangen.

Im ersten Berichtsjahr wurde, um einen Überblick zu erhalten, der neue Batch-Betrieb mit seinem Produktionsgebäude (Reaktoren), den Nebengebäuden (Lösungsmittelager und Regeneration) analysiert. In der Folge wurde eine Top-Down-Modellierung vorerst des Dampfverbrauchs als wichtiger Prozess-Energieträger ausgeführt, die jedoch eine schlechte Korrelation zwischen Dampfverbrauch und der Menge produzierter Chemikalien zeigte und daher eine Bottom-up-Modellierung notwendig machte. Während 8 Tagen wurde

der Dampfverbrauch auf einem Niveau von 5 bar im ganzen Betrieb untersucht. Von den 36 gefundenen Dampfverbrauchern sind fünf kontinuierliche Prozesse (Lösungsmittelregeneration). Diese wurden separat gemessen. Diese machen rund 40% des gesamten Dampfverbrauchs aus. Der Dampfverbrauch der restlichen 31 im Batch-Mode betriebenen Apparate (Reaktoren) wurde modelliert. Dabei wurden die bekannten empirischen Verlustkoeffizienten (Wärmeverluste Apparate) aus dem Vorgängerprojekt übernommen. Ohne die gebäudespezifischen Verlustfaktoren zu berücksichtigen, zeigt das Bottom-up Modell bereits eine gute Übereinstimmung. Der modellierte Verbrauch lag rund 5% unter dem effektiven Verbrauch. Der Verbrauch für die Infrastruktur ist allerdings noch nicht in den Modellberechnungen enthalten. Während der Beobachtungsperiode wurden neun verschiedene Produkte hergestellt. Wie bereits im Vorgängerprojekt, fällt auch hier der grosse Energieverlust der Dampfverteilung mit über 30% auf. Hier liegt ein wesentliches Sparpotenzial vor.

Im Projekt **Abfall-Lösungsmittel-Verwertung in der chemischen Industrie** [3] geht es um den

nachhaltigen Umgang mit Abfall-Lösungsmitteln (ALM). Es stehen zwei Verwertungsmöglichkeiten zur Verfügung: Rückgewinnung durch Auftrennen (Destillation, siehe Titelbild) oder die thermische Verwertung, d.h. Verbrennen (Prozesswärmeerzeugung).

Im Berichtsjahr konnte zusammen mit den Industriepartnern ein Inventarmodell zur Bewertung von Destillationsprozessen entwickelt werden. Das Modell basiert auf einer statistischen Analyse von 150 bekannten Abfall-Lösungsmitteldestillationen. Mit Hilfe dieses *Destillations-Inventarmodells* und der *Multi-Input-Allokationsmodelle* der Verbrennung konnte wie geplant eine erste Demo-Version des Ökobilanz-Softwareprogramms erstellt und den Industriepartnern zum Test übergeben werden. Es erlaubt die freie Definition/Eingabe eines Abfalllösungsmittelgemischs. Das Programm

berechnet mittels der üblichen Ökobilanzmethoden die Umwelteinwirkung von Verbrennung und Destillation. Dank der guten Rückmeldungen der Industriepartner konnte ein Anforderungsprofil fürs definitive Softwareprogramm festgelegt werden. Als zweiter Schwerpunkt wurde im Berichtsjahr eine grobe Lösungsmittelbilanz für die Schweiz erstellt. Ein Drittel der ermittelten Menge wird von den beteiligten Industriepartnern selber verwendet. Im Jahre 2001 wurden rund 400'000 Tonnen Lösungsmittel importiert. Die Hälfte davon verdampfte oder wurde für Halbfabrikate weiterverarbeitet. Etwa 190'000 Tonnen Abfalllösungsmittel wurden verbrannt (thermische Verwertung). Eine im Berichtsjahr initiierte Zusatzarbeit wird bis 2005 die Lücke bei den fehlenden Ökoinventaren von wichtigen Lösungsmitteln schliessen.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Momentan ist die Zusammenarbeit mit der ETH Zürich und mit der Basler Chemie gut etabliert. Mit der EPF Lausanne beginnt die Zusammenarbeit ab 2005 im Rahmen eines internationalen Projekts im Bereich Zellstoff- und Papierherstellung mit Schweizer Industrie-Beteiligung. Die Fachhochschule Wallis hat für 2005 ein Projekt Prozess-Analyse und Integration für Gewächshäuser beantragt. Der VSTB (Schweizer Trocknungsbetriebe) und FBB (Beton/Backsteinhersteller) haben

für 2005, Projekte im Bereich der Prozessoptimierung eingereicht. In diesen Projekten ist der Einbezug von Fachhochschulen vorgesehen. Auf Empfehlung der befragten Schweizer Industrie und auch wegen beschränkter Programmmittel und Ressourcen wird auf das Engagement in internationalen Forschungsaktivitäten der IEA und EU vorerhand verzichtet. Die internationalen Forschungsaktivitäten der IEA und der EU werden jedoch beobachtet.

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Das Ziel, den Energieforschungsbedarf der energieintensiven Schweizer Industrie im Berichtsjahr abzuklären und daraus ein Programmkonzept 2004-07 zu entwickeln, konnte nach Startschwierigkeiten erreicht werden. Die Abklärung des Forschungsbedarfs in den EnAW-Zielverein-

barungsgruppen erwies sich als fruchtbar. Aus den gezielt angegangenen Fachhochschulen kam im Berichtsjahr wenig Echo. Das Industrieinteresse an Forschungsprojekten nimmt jedoch zu und ab 2005 wird die Anzahl Projekte des Programms ansteigen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

Die Projektberichte können von www.energie-schweiz.ch, Rubrik *Ratgeber, Angebote Unternehmen, Verfahrenstechnische Prozesse (F&E)* herunter geladen werden.

- [1] Patric S. Bieler, ehemals Lab. für technische Chemie ETH Zürich: ***Analysis and Modeling of the Energy Consumption of Chemical Batch Plants*** (SB).
- [2] Andrej Szijjarto, (andrej.szijjarto@chem.ethz.ch), Institut für Chemie- und Bio-Ingenieur-Wissenschaften, ETH Zürich: ***Modeling and Optimization of Energy Consumption in Multipurpose Batch Plants*** (JB).
- [3] 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, Phase 2*** (JB).

SOLAIRE ACTIF: CHALEUR ET STOCKAGE DE CHALEUR

Rapport de synthèse 2004 pour le programme de recherche

Jean-Christophe Hadorn (R+D)

jchadorn@baseconsultants.com

Urs Wolfer (P+D)

urs.wolfer@bfe.admin.ch

	<p> SPF Nr. S18 Modell Wärmecenter I omnia 920 Liter UL Hersteller Ruesch Solartechnik AG PLZ/Ort CH-5600 Dotikon Telefon +41 (0)58 818 77 00 Fax +41 (0)58 818 77 10 E-Mail info@rueschsolar.ch Internet www.rueschsolar.ch </p>
<p>Aufbau</p>	<p>Technische Daten</p>
	<p> Bruttofläche 16 m² Speicher 920 Liter Datum 01.09.2004 Bericht Jahresleistungsprüfung </p>

Exemple de fiche descriptive de «combisystème»

Les résultats des 10 systèmes standardisés testés en 2003 et 2004 par le SPF (Institut für Solar-technik) à la HES de Rapperswil (HSR) sont disponibles sur le site <http://www.solarenergy.ch>

Centres de gravité du programme et buts fixés

Le marché solaire thermique en Suisse stagne depuis plusieurs années à une valeur de l'ordre de 30'000 m² de capteurs installés par an (figure 1). Ce chiffre permet un maintien de l'activité des professionnels, qui continuent de proposer des innovations, mais rend difficile les réductions de coût. Les exportations vers les 2 seuls marchés porteurs que sont l'Allemagne et l'Autriche sont rendus difficiles par notre niveau de coût, et, vers l'Espagne, par les barrières administratives. En outre, les fabricants de ces pays et d'autres, à volume de marché encore plus important, telle la Chine (2'500'000 m² par an !), souhaitent s'introduire et s'imposer aussi sur le marché suisse.

Une réponse que peut apporter le programme R+D est de soutenir la qualité des produits et surtout des systèmes complets, et de rechercher l'innovation dans les domaines cruciaux que sont le stockage et les systèmes combinés.

Une autre réponse serait le soutien à des projets P+D qui pourraient aider à convaincre le marché de la fiabilité et de l'intérêt de solutions solaires ; mais les moyens financiers sont devenus bien limités en ce domaine en 2004 pour le solaire.

Pour l'année 2004, nous avons orienté les travaux de R+D sur:

- Le maintien de nos capacités de tests de qualité des composants des capteurs et leur utilisation pour aider les industriels à mettre au point ou améliorer leurs produits.
- La mesure comparée de systèmes combinés, simultanément à leur simulation, dans le but

de qualifier les systèmes et d'informer au mieux les consommateurs.

- Le stockage de chaleur à court terme dans des nouveaux matériaux, et le stockage de froid de la nuit au jour en été.
- La mise au point d'un procédé pour déposer des couches minces sur des substrats de verre plus grands qu'en 2003, permettant de les faire apparaître d'une couleur.

En 2004, le programme **Solaire actif: chaleur et stockage de chaleur** a été organisé avec les axes principaux suivants:

1. **Capteurs solaires et outils:** maintenir et utiliser intensivement la plateforme de tests du SPF (*Institut für Solartechnik, Prüfung und Forschung*) à la HES de Rapperswil (HSR), et le logiciel **Polysun**.

2. **Systèmes combinés standardisés:** utiliser le banc d'essai du SPF dans le programme de test *Kombi-kompakt+* ouvert aux industriels solaires moyennant une participation financière.

3. **Solaire à concentration:** trouver des débouchés au capteur solaire à concentration dénommé *Capteur Extra Plat* de Cogener.

4. **Stockage saisonnier de chaleur:** obtenir les résultats de la première année d'exploitation du plus grand stock saisonnier à basse température de Suisse, situé à Root sous les bâtiments de la SUVA.

5. **Stockage du futur:** faire travailler de concert les équipes de la Tâche 32 du Programme SH&C de l'AIE *Advanced storage concepts for solar and low energy buildings*.

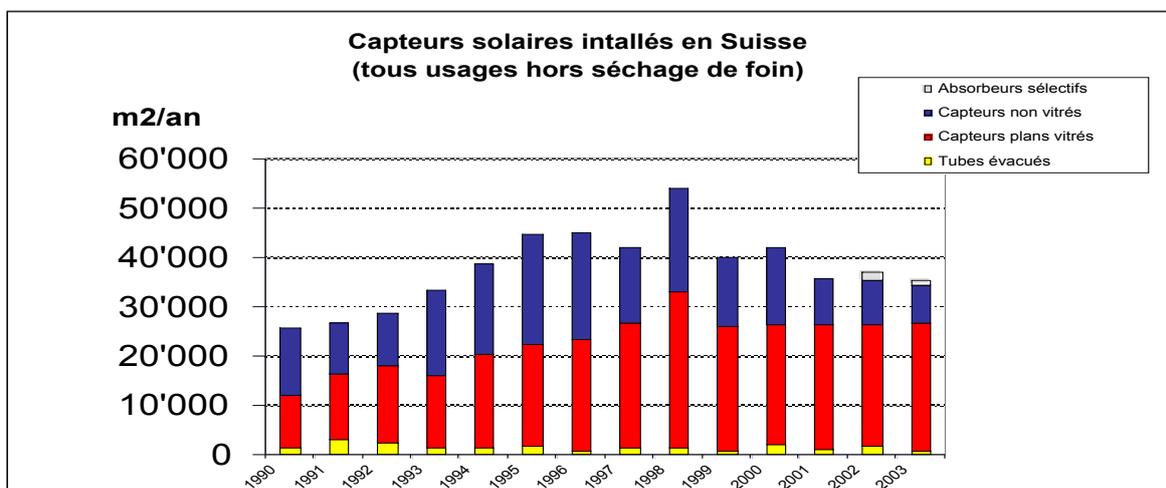


Figure 1: évolution des aires de capteurs solaires thermiques installés en Suisse (Source SOLAR, 08.2004)

6. **Stockage court terme:** prouver la faisabilité du déphaseur thermique du CUEPE (Centre Universitaire d'Étude des Problèmes de l'Énergie) de l'Université de Genève.

7. **Gestion:** présenter le plan directeur du programme 2004-2007 à la CORE.

Travaux effectués et résultats acquis pour 2004

COMPOSANTS DE LA TECHNIQUE SOLAIRE

Capteurs solaires thermiques et matériaux

Les travaux de ce secteur représentent désormais la part principale du programme. Nous n'avons pas voulu diminuer le soutien au pôle de compétences du SPF de la HES de Rapperswil (HSR). Le SPF joue en effet un rôle prépondérant en Suisse en matière de tests de qualité, de recherche appliquée en énergie solaire et de soutien aux industriels du secteur.

En 2004, le SPF a réalisé les travaux suivants [1, 2, 3, 4]:

Mesure des caractéristiques et test de qualité des capteurs solaires: les tests de capteurs se sont déroulés de manière routinière malgré une météorologie peu favorable. L'installation de mesures et de production des rapports de tests a été encore améliorée pour réduire la durée d'un test extérieur. Au total ce sont 117 tests de capteurs qui ont pu être effectués, pour aboutir à 55 tests publiés avec un numéro de test. 45 capteurs ont été soumis au test de performance seul, et 37 au test de performance + qualité. Seulement 10 capteurs ont passé le test de qualité, qui est exigeant, mais conforme aux nécessités d'un marché difficile.

La moitié provient de Suisse. Le reste provient surtout d'Allemagne et d'Autriche, un peu d'Australie et, à noter, de la Grande-Bretagne qui a lancé le programme *ClearSkies* pour des produits de qualité.

Le nombre de **capteurs à tubes évacués** soumis en test au SPF a nettement **augmenté**. Ils ont représenté en 2004 30% des capteurs testés !

La qualité des capteurs sur le marché ne s'est **pas améliorée** en 2004. Le test de qualité du SPF devrait être renforcé en ce sens, mais il est déjà rarement passé avec succès !

Pour les absorbeurs, la tendance à passer de l'aluminium au **cuivre soudé** s'est confirmée. Le comportement à long terme de la soudure laser est cependant encore méconnu.

Les capteurs à tube sous vide ont souvent des **défauts de vide** et, en outre, l'isolant présent dans le collecteur-distributeur ne supporte pas toujours les 300°C atteints en stagnation (mesure selon un nouveau procédé mis au point au SPF).

La qualité des capteurs n'est **pas liée à la taille du fabricant** ! L'Allemagne privilégie trop la performance par rapport à la qualité qui est plus un gage de fonctionnement à long terme. Le label Solar Keymark serait suffisamment exigeant, mais il a de la peine à s'imposer en Europe.

Peu de moyens ont été alloués au développement de nouveaux capteurs, par choix, pour ne pas déstabiliser le marché et faute de demande de l'industrie. Par contre, des tests d'**absorbeurs en aluminium et cuivre** ont été effectués avec un industriel. L'efficacité s'avère bonne, la durabilité par corrosion est encore problématique.

Un nouveau banc test permettant de tester un panneau de 12,5 m² a été mis en fonction pour répondre à la demande.

Des **tests communs** entre laboratoires européens, dont le SPF, sous la norme DINCERTCO, ont été réalisés. Le SPF est accrédité *DIN geprüft* et *Solar Keymark* et régulièrement inspecté par le SAS



Figure 2: nouveau banc test de capteurs permettant de tester un ensemble de 12,5 m², développé par le SPF

(organisme suisse d'accréditation). Le SPF fait partie du groupe TK144 de la SNV (Association suisse de normalisation).

La **Suède** est le premier pays à introduire le label **Solar Keymark comme une obligation** sur son marché. L'Espagne n'accepte toujours pas les tests réalisés hors de ses frontières. La France a assoupli un peu sa position, mais impose encore des tests complémentaires à la norme européenne. Celle-ci est en révision, et la Suisse ne peut que marginalement y imposer des améliorations. Il n'existera, par exemple, pas de modèles communs de calcul de la production annuelle des capteurs ; ce qui rend difficile les comparaisons internationales.

Le **CD-ROM SPF-Info CD 2004** qui contient tous les tests de capteurs aisément accessibles et comparables entre eux a été distribué à près de 2'000 exemplaires.

Le SPF participe depuis le début à la Tâche 27 du Programme **Solar Heating and Cooling (SH&C) de l'AIE Performance of solar façade components** qui a publié l'ouvrage *Performance and Durability Assessment: Optical Material for Solar Thermal* chez Elsevier Science. C'est une somme considérable d'expériences sur les matériaux utilisés dans le solaire thermique pour leurs propriétés optiques. Les travaux sur les réflecteurs et les verres anti-reflets se poursuivent.

Pour les besoins d'une expertise scientifique financée par notre programme, le SPF avait réalisé en 2003 un banc de test de la **durabilité d'absorbeurs sous vide à haute température** (400°C) [5]. Trois absorbeurs commerciaux ont été testés en 2004.

Malgré une industrie solaire atone et sans croissance en Suisse en 2004, le SPF a été mandaté pour des **nouveaux développements**, tels que:

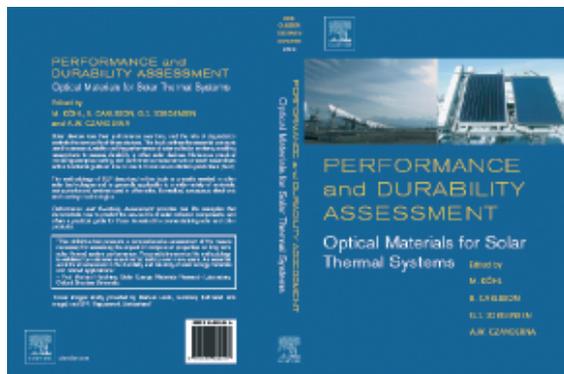


Figure 3: dix années d'expérience internationale concentrées dans le livre sur les matériaux optiques pour le solaire publié en 2005 chez Elsevier par un groupe de travail de l'AIE, avec la participation très active du SPF

conception d'un nouvel absorbeur à coût réduit, tests des raccords entre capteurs (banc unique développé au SPF), etc.

La qualité **Solarglas**, mise au point au SPF pour le verre solaire, est un succès du SPF, l'industrie européenne utilisant la dénomination et la normalisation proposée. En 2004, 5 nouveaux verres ont pu recevoir du SPF la mention *Solarglas* (pour une liste complète cf. www.solarenergy.ch), dont 1 amélioré grâce au test. Au total, ce sont 9 verres certifiés *Solarglas* qui sont sur le marché.

Un projet de **cuisseur solaire ultra-léger** [10], bon marché et transportable a débuté au Centre de compétences neuchâtelois en la matière (CNCS Centre neuchâtelois de cuisine solaire). Les critères retenus sont sévères: cuisson de 1 L d'eau en 45 min et poids maximal de 2 kg avec la casserole. Après une analyse des 254 brevets existants, une étude de la forme du réflecteur pliable a été réalisée.

L'EPF de Lausanne a poursuivi le développement de couches minces interférentes permettant d'envisager des **verres solaires de couleur** [9], afin de donner plus de liberté architecturale aux capteurs solaires. Un brevet a été déposé en 2003. Le procédé de dépôt sur un verre développé à l'EPF de Lausanne est le procédé dit *sol-gel*, dans lequel le verre, trempé dans des solutions d'oxyde, est retiré lentement du bain avec le dépôt d'une couche de dioxyde de titane ou de silicium de l'ordre de 30 à 150 nm.

L'EPF de Lausanne a démontré que la perte d'énergie solaire incidente sur l'absorbeur n'est au pire que de 8% dans le cas de la couleur verte que l'on choisit de réfléchir. Des tests poussés [9a] ont été réalisés pour maîtriser les méthodes. Certains appareils sont disponibles ou ont été montés nouvellement à l'EPF de Lausanne et d'autres à l'Université de Bâle. La synergie de moyens est recherchée. En fin 2004, la couche mince a été réalisée sur du verre 6 cm x 7 cm, et de 4 mm d'épaisseur, permettant de juger une surface de plusieurs cm². Une qualité suffisante et homogène a été obtenue après un ensemble d'améliorations du procédé, depuis la préparation du substrat jusqu'au séchage au four. Un index de réfraction contrôlé a pu être obtenu par un mélange d'oxydes, réalisé à partir du mélange obtenu par hydrolyse contrôlée des précurseurs du SiO₂ et du TiO₂. La nouvelle couche d'oxydes mélangés est utilisée comme l'une des couches d'interférence, car son index de réfraction est contrôlé, et cela est une grande nouveauté scientifique [9b]. L'Université de Bâle poursuit, en collaboration avec l'EPF de Lausanne, le même

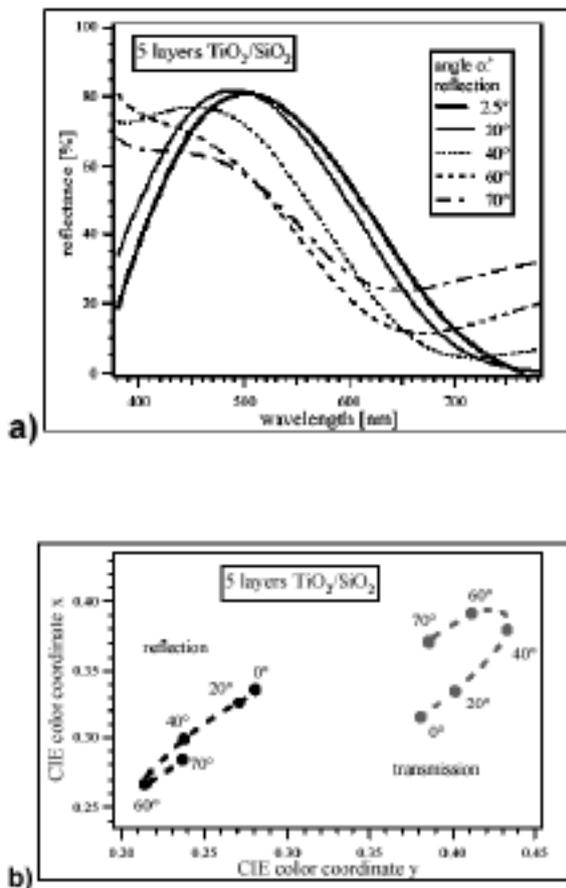


Figure 4: dépendance angulaire en réflectance spectrale, et en réflexion et transmission de couleurs, mesurée pour un ensemble de 5 couches interférentielles déposées sur un verre par le procédé SolGel à l'EPF de Lausanne

but de réaliser des verres en couleur, mais avec une technique de dépôt toute différente: le *magnetron sputtering*. Les résultats sont décrits dans un autre programme de l'OFEN [9c].

Outils de simulation

Les outils de simulation sont la base du projet solaire. Nous avons en Suisse pour le solaire thermique nos deux outils essentiels que sont **Meteonorm** et **Polysun**, que nous entretenons au meilleur niveau.

En 2004 un **plug-in de Meteonorm pour le futur Polysun 4** [8] a été écrit par la firme Meteotest, à Berne, à partir de *Meteonorm*. Des ajouts par rapport à la version actuelle (**Meteosun** développé pour **Polysun 3**) ont été faits qui permettent d'extrapoler le rayonnement de grande longueur d'onde et l'humidité relative pour chaque heure. Une comparaison sur 5 sites des calculs faits montre une bonne cohérence des résultats.

Quatre mises à jour de **Polysun** [4] ont été proposées par le SPF en 2004, notamment pour enrichir la base de données des capteurs qui comptait 330 modèles à fin 2004. 70 licences nouvelles et 35 licences complémentaires ont été vendues en 2004, et le site Internet du SPF a vu 6'000 téléchargements de la version de démonstration, soit une augmentation de plus de 30%. **Polysun 4** est terminé avec le modèle de calcul de la météorologie intégré, ainsi que le modèle de calcul de la demande du bâtiment (version spéciale de **Helios** du LFEM/EMPA) et la possibilité de simuler plusieurs pompes, des tés et des vannes 3-voies. De nouveaux composants ont été développés.

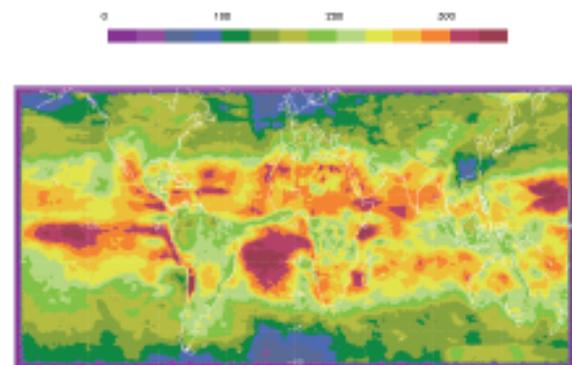


Figure 5: irradiance moyenne en mars sur la Terre en W/m^2 , extrapolée par **Meteonorm** à partir de données de satellites (*Meteotest*)

Le site Internet (en 5 langues) du SPF www.solarenergy.ch est toujours très sollicité et a été migré une nouvelle fois sur un serveur plus puissant. Chaque jour sont appelés 330 rapports de tests de capteurs, 100 tests de composants, 100 publications en pdf, et 50 rapports de tests de systèmes ! Un énorme succès de diffusion de l'information. Le serveur interne du SPF, monté en Raid, s'est avéré très stable et la capacité a été doublée à 140 GB.

Le SPF a fortement développé en 2004 ses compétences en matière de simulation de base (logiciel de dynamique des fluides, également utilisé dans un projet CTI, et de thermique 2D) de manière à améliorer les détails des composants (capteurs, conduites, pompes, échangeurs ou stockage) en relation avec les tests de composants pratiqués aux bancs, cela pour offrir une palette de services plus larges à l'industrie solaire.

Meteotest a participé pour la Suisse au projet européen **SODA** du Programme *IST*, achevé en 2003. Le site web qui résulte de ces travaux a été maintenu en 2004 par l'École des Mines de Paris,

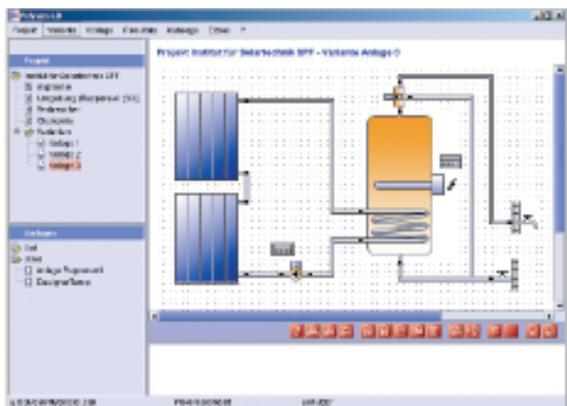


Figure 6: le nouveau **Polysun 4** entièrement reprogrammé et étendu sera vendu durant 2005 via Internet par le SPF. En mode expert, toute installation pourra être librement définie (<http://www.solarenergy.ch/>)

et permet d'accéder en ligne à toute donnée météo utile, pour la planète (www.soda-is.com). Le futur du site est incertain par manque de modèle économique viable.

SYSTÈMES ET INSTALLATIONS SOLAIRES POUR LE BÂTIMENT

Systèmes combinés: mesures et optimisation

Les systèmes combinés *eau chaude et chauffage solaire* se développent fortement en Europe, comme nous l'avions anticipé, en créant en 1998 la Tâche 26 du Programme SH&C de l'AIE qui a délivré un nombre important de travaux utiles. En 2004 et en matière de systèmes, les travaux suivants ont été accomplis:

Le nombre de tests de *kits* de préparation d'eau chaude sanitaire n'a été que de 3 en 2004. Il s'agit surtout de systèmes à thermosiphon qui ont un regain d'intérêt dans certains pays. Un système à cuve plastique sans pression, proposé par un constructeur, a été amélioré et optimisé au banc [2].

Pour simplifier la liaison entre capteurs et cuve, un système de tube flexible est souvent utilisé depuis quelques années, grâce à l'avènement de la technique *low flow* qui a permis de mettre en œuvre des tubes de petits diamètres jusqu'à 5 mm, en silicone. Par rapport au cuivre, cela facilite la pose, mais des problèmes de tenue dans le temps sont apparus. Au laboratoire, des **tubes en élastomère** [6] se révèlent plus durables. Des tests *in situ* en 2004 ont montré la bonne résistance de ces tubes. Le problème principal est leur coût.

Trois nouveaux combisystèmes ont été testés en 2004 sur le stand d'essai *semi-virtuel* du SPF. Au total, ce sont **18 systèmes qui ont été testés** dans le cadre de la campagne *Kombi-Kompakt+*, soutenu financièrement par notre programme. Le dépouillement et l'analyse des 18 systèmes ont été menés à bien et 10 résultats ont pu être publiés (cf. page de titre). La presse spécialisée a bien relayé les résultats obtenus [2, 36]:

- les performances des systèmes sont très bonnes pour les 10 systèmes publiés, avec des taux d'économie d'énergie non renouvelable de l'ordre de 25% dans une maison de référence à Rapperswil, demandant 25 MWh/an et avec 13 à 15 m² de capteurs solaires ;
- la nécessité de tester l'ensemble solaire + appoint, une des difficultés du banc de test, notamment pour ce qui est de la mesure précise d'un appoint au gaz à enclenchement sporadique, a été prouvée; des problèmes de réglage *solaire versus appoint* ont été observés sur plusieurs systèmes et sont souvent observés dans la pratique sans pouvoir être correctement diagnostiqués faute d'instruments de mesure *in situ*;
- des conceptions de systèmes très différentes mènent à des taux d'économie d'énergie auxiliaire semblables ; c'est le choix des composants, les erreurs éventuelles de régulation et le réglage qui font la différence, plus que les différences entre concept global de système;



Figure 7: une cuve sans pression dans un kit solaire: un avantage si les échangeurs sont correctement dimensionnés ; ce que le banc test révèle, entre autres paramètres (SPF)

- les tests ont été limités à un seul cas de référence (villa) pour des raisons de coût ; il sera très difficile dans ces conditions de faire financer à l'avenir un test uniquement par le fabricant, comme cela a été le cas pour cette première série de tests ; rendre ce service rentable pour le SPF paraît impossible, malgré la réelle nécessité d'un test avant de mettre un système sur le marché.

PRODUCTION DE CHALEUR À HAUTE TEMPÉRATURE ET D'ÉLECTRICITÉ

Centrale solaire pilote de 10 kW_{el}, Small Power Systems (SPS) [7a] : La centrale est composée de 2 éléments: le capteur extra plat (CEP) développé par *Sunalpes sarl* (<http://www.sunalpes.ch/>), société qui a repris les actifs de *Cogener sarl*, et l'unité thermodynamique à cycle de Rankine (Organic Rankine Cycle ORC) développée par l'EPF de Lausanne.

Le tube du **capteur extra plat à concentration CEP** [7b] n'a toujours pas pu être mis au point. La société *Cogener* a subi des difficultés financières en 2004. Son rapport sur la méthode proposée d'industrialisation du CEP attendu pour novembre 2004 n'a pas été reçu. Afin de valoriser les connaissances acquises et les 2 lignes de CEP réalisées sur le site de l'EPF de Lausanne, la société *Sunalpes*, qui a repris les actifs, a cherché un site pouvant utiliser une production de chaleur solaire à moyenne température. Sa recherche a été fructueuse: la société Les Salines de Bex a accepté de tenter de réaliser une production pilote de *sel solaire*, soit à partir des saumures de Bex, d'évaporer le sel en utilisant la chaleur solaire ! L'OFEN a accepté le principe du transfert des 2 lignes du CEP sur le site de Bex pour 2005, et l'abandon des droits sur le concept du CEP afin de faciliter les développements ultérieurs (à financer par d'autres sources). Le CEP à Bex trouve une nouvelle chance de devenir un producteur d'énergie solaire à 150°C à haut rendement, si les détails techniques encore à terminer peuvent l'être. Un projet d'utiliser le CEP en Australie dans une unité industrielle de production de chaleur, dont nous avons financé l'étude de faisabilité, a échoué, pour des raisons qui nous sont restées obscures malgré les demandes faites par *Cogener* au maître d'ouvrage. En ce qui concerne l'unité de Rankine (ORC), 2004 devait permettre une expérimentation de l'influence de l'huile sur les échangeurs à plaque et un test de la pompe placée en bout d'arbre du *scroll*, dont le concept original a été élaboré en 2003. Cela est très regrettable et nous espérons que le projet pourra tout de même trouver une source de financement en 2005.

STOCKAGE DE CHALEUR

Dans le projet **Serso** [13] on dégivre un pont avec de l'énergie solaire et un stockage saisonnier de chaleur dans le terrain et des mesures ont été effectuées depuis 1999. En 2004, la redondance des mesures a permis de contrôler leur précision, de les corriger et de remplir les trous de mesure pour disposer de deux années consécutives. Avec un pas de temps de 15 minutes, les mesures ont permis de *saisir* aussi bien la dynamique à court terme qu'à long terme du stockage. Ces deux ans devront permettre de valider et de calibrer avec succès le modèle de simulation du stockage, mais, faute de disponibilité, le travail a été repoussé en 2005.

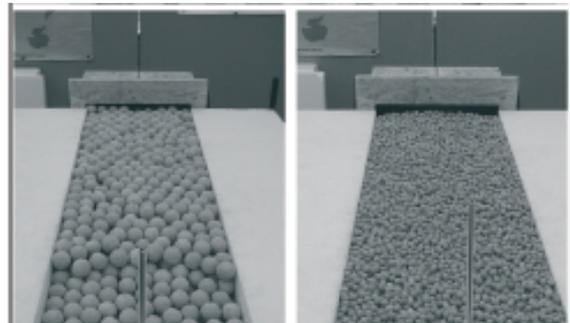


Figure 8: 2 géométries possibles d'un déphaseur thermique contrôlé (CUEPE, Université de Genève)

Le **déphaseur thermique diffusif** [14], une idée originale de MM. Hollmuller et Lachal du Centre Universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE) de l'Université de Genève, permet d'accumuler de la chaleur ou du froid et de restituer l'énergie avec un déphasage prévisible, par exemple, entre 6 et 8 heures et surtout avec un très faible amortissement. Cette propriété a été démontrée en 2004, dans diverses géométries de stockage. Le rapport final, paru en 2004, présente les résultats suivants:

- La possibilité de déphaser une onde pratiquement sans l'amortir a été prouvée théoriquement et expérimentalement pour la première fois.
- Une analyse théorique poussée a montré que l'échange convectif air-matière doit être très bon, et que la géométrie intérieure doit être faite de couches minces ou de billes ou de tubes de petit diamètre (10 à 30 mm). L'enveloppe extérieure doit être isolée suffisamment, mais n'est pas un point critique. Par contre, la non homogénéité des plaques ou des billes, et donc du flux d'air de charge, est un facteur très critique.

- Deux prototypes ont été construits méticuleusement, comme le demande la théorie de l'homogénéité du flux entre les billes ou les plaques, et bien instrumentés. La comparaison entre mesures et calcul a été excellente. Le phénomène est bien maîtrisé et l'inhomogénéité du flux peut être évitée à un point tel qu'une réalisation fonctionnelle est possible.
- La poursuite d'études est nécessaire pour déterminer les caractéristiques idéales du déphaseur dans un système (simulation ou mesure), pour développer une sphère ou une tuile plate adaptée et bon marché, et pour évaluer l'intérêt de matériaux à changement de phase dans les sphères. Un projet pilote pourrait être lancé, qui intégrerait un *stock déphaseur pour le rafraîchissement estival* d'une villa.

La Tâche 32 du programme *Solar Heating and Cooling* (SH&C) de l'AIE: **Advanced storage concept for solar and low energy buildings** [16], s'est réunie 2 fois en 2004, en juin à Arvika, Suède en décembre à Graz, Autriche. Huit équipes de pays différents y participent. Les travaux sont répartis en 4 sous-tâches :

La **sous-tâche A** a défini les caractéristiques du système de référence (une villa solaire) que les équipes des autres sous tâches doivent chauffer et refroidir avec une solution possédant un stock thermique de type nouveau. Elle a également étendu la méthode « Fractionnal Energy savings ».

La **sous-tâche B** traite du stockage chimique et par sorption. Trois projets sont évalués dans cette catégorie, dont le projet suisse de stockage par sorption du SPF, et le projet TCA de Suède, également testé au SPF. Aucun pays n'a malheureusement proposé un stockage chimique, faute de moyens financiers.

La **sous-tâche C** traite du stockage par des matériaux à changement de phase (PCM). Cinq projets sont évalués dans cette sous-tâche, dont le projet CoSyPCM de la HES d'Yverdon (EIVD). Le PCM pourrait cependant réduire le nombre d'enclenchement – déclenchement d'un appoint au gaz ou au mazout, et réduire ainsi très fortement les émissions polluantes en été.

La **sous-tâche D** traite du stockage en cuve à eau. En Suisse, le SPF apporte, dans ce cadre, les résultats des tests des combisystèmes présentés préalablement.

Un livre est en cours de réalisation avec plusieurs experts de cette Tâche 32 comme contributeurs.

Il s'agit de l'état de l'art du stockage thermique pour le solaire.

Le SPF a testé un nouveau prototype de **machine thermodynamique permettant de produire de la chaleur et du froid au moyen d'un procédé d'absorption** [12]. La machine, dénommée TCA (*Thermo Chemical Accumulator*), est produite par une société suédoise possédant plusieurs brevets sur le concept. La qualité du laboratoire SPF a été retenue pour ces essais et vu le caractère très nouveau du concept et la potentialité qu'il représente sur le papier de permettre un stockage saisonnier de chaleur pour une villa, notre programme de recherche a contribué à financer les essais. Une solution saline de chlorure de lithium ($\text{LiCl}\cdot\text{H}_2\text{O}$) est utilisée comme fluide. La machine dispose de 4 chambres: un condenseur/évaporateur, un réacteur, un bac pour la solution et un bac pour les condensats d'eau. Elle est reliée à 3 circuits extérieurs: la boucle solaire qui apporte l'énergie, le refroidisseur externe qui peut dissiper de l'énergie et le circuit de distribution au bâtiment. Les circuits sont simulés au banc d'essai. La machine, testée au SPF, peut délivrer au max 18 kW de chaleur à 90°C et 10 kW de froid à 12°C avec une température de rejet à 25°C. L'important est la performance mesurée par le COP. Les résultats ont montré que le COP chute avec l'augmentation de la puissance, de 0,5 à 0,35 entre 2,5 kW et 5,5 kW, du fait d'une régulation non correcte. L'ensemble fonctionne, mais avec une performance médiocre. Le dialogue avec le fabricant se poursuivra sans doute en 2005, car la mise au point va s'avérer très délicate.

Le SPF travaille sur un **procédé de stockage long terme par sorption** [11]. Après avoir travaillé avec la zéolithe en 2003, dont le point de séchage est de 200°C, le couple eau-silicagel (séchage à 120°C) a été retenu comme un candidat potentiel. Les résultats obtenus en 2004 montrent qu'un système à sorption a toujours besoin d'une source de chaleur comprise entre 10 et 30°C pour produire à 60°C, même en hiver. On parle désormais plutôt de pompe à chaleur par sorption que de stockage. Ce projet représente la Suisse dans la sous-tâche B de la Tâche 32 du Programme SH&C de l'AIE. L'échange d'expériences au niveau international s'est montré en 2004 très profitable au projet suisse [16].

Stockage avec matériaux à changement de phase (PCM)

Le projet **CoSpy-PCM** [15] mené par la HES d'Yverdon (EIVD) consiste à rechercher la meilleure solution pour améliorer la densité du stock d'un système combiné au moyen de matériau à change-

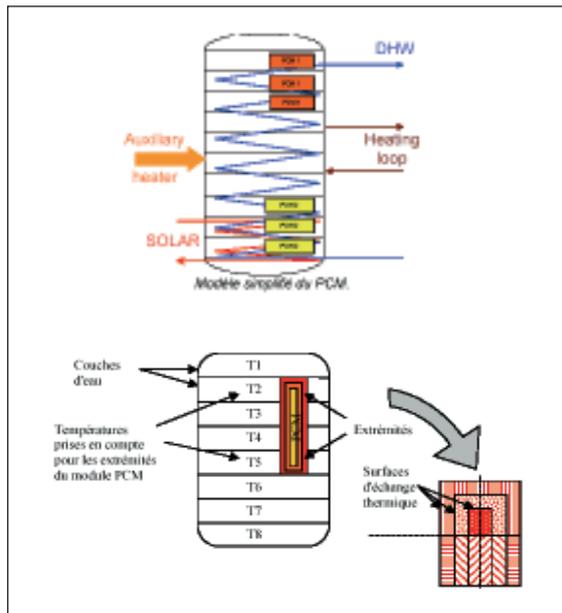


Figure 9: modèle simplifié et modèle plus élaboré d'éléments à changement de phase dans une cuve à eau

ment de phase. Ce projet fait partie de la Tâche 32 du Programme SH&C de l'AIE. Aucun modèle de cuve avec PCM n'existe dans le logiciel TRNSYS le logiciel de systèmes que nous utilisons dans cette Tâche 32. Un développement a été édébüté.

Le transfert de chaleur entre l'eau et l'élément PCM a été étudié théoriquement. Difficile à appréhender sans mesures, une valeur constante de $200 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ sera considérée en première approche avant les mesures de système.

Collaboration nationale

La collaboration entre le SPF et l'industrie solaire suisse et étrangère est fréquente, le SPF étant un centre de ressources solaires reconnu mondialement. Le SPF a collaboré avec la nouvelle Agence nationale suisse SAFE pour la diffusion

des résultats des tests de combisystèmes (cf. www.topten.ch). Le SPF participe par ailleurs à 2 projets CTI avec 2 industries suisses: l'un concerne une toiture solaire étanche mince, et l'autre une vanne de réglage à large spectre d'usage.

Collaboration internationale

Le SPF a réussi à intégrer des projets européens dans le cadre du 6^e Programme-cadre de recherche et de développement technologique de l'UE (projet **NEGST**: *New generation of solar thermal systems*, action de coordination entre 17 partenaires pour réduire le coût des systèmes combinés et des kits solaires pour l'eau chaude sanitaire). Le SPF dirige deux paquets: WP1, *Next generation of systems* et WP4, *New standards for solar fluids*. Cela pourrait déboucher sur un futur banc test de fluide antigel pour le solaire, qui n'existe pas à l'heure actuelle.

Le SPF participe à la Tâche 27 du Programme SH&C de l'AIE : **Performance of Solar façade components** qui poursuit ses travaux durant encore 1 an sur des aspects spécifiques des matériaux pour les capteurs solaires.

La Suisse dirige depuis juin 2003, la Tâche 32 du Programme SH&C de l'AIE, qui s'intitule désormais

Advanced storage concepts for solar and low energy buildings.

Le SPF et l'EPF de Lausanne collaborent au projet européen **SOLABS** (*Development of unglazed solar absorbers, resorting to coloured selective coatings on steel material, for buildings façades and integration into heating systems*).

Le bureau d'ingénieur P. Berchtold, qui a réalisé l'installation pilote de la SUVA à Root, a été choisi pour réaliser à Gelnhausen en Allemagne une installation avec stockage souterrain de 85 sondes de 99 m de profondeur pour un volume total de $340'000 \text{ m}^3$! C'est là une retombée de nos travaux P+D sur le stockage depuis plus de 10 ans.

Le projet SUVA a fait l'objet de nombreuses visites, et notamment d'une délégation d'experts et d'investisseurs italiens.

Projets pilotes et de démonstration

Im Jahre 2004 konnten aufgrund des Entlastungsprogramms 2003 keine neuen Projekte gestartet werden. Das Programm beschränkte sich daher auf die Begleitung und den Abschluss der laufenden Projekte. Von den 16 Projekten zu Beginn des Jahres, konnten 5 abgeschlossen werden. Die meisten Anlagen befinden sich noch in der Messphase und werden im Laufe des Jahres 2005 abgeschlossen.

Das Projekt **Zirkulationseinbindung von solaren Warmwasseranlagen im MFH** [22] hat erfolgreich bewiesen, dass die direkte Einspeisung thermischer Solarenergie in das Warmwassernetz möglich ist. Die Mindererträge halten sich mit weniger als 10% gegenüber einer normalen Anlage im Rahmen. Die Anlagenkosten liegen ca. 20% tiefer, so dass netto mit über 10% tieferen Kosten gerechnet werden kann. Um die regeltechnischen Probleme in den Griff zu bekommen, wurde im Rahmen eines KTI-Projektes ein Kompaktmodul realisiert, welches bald auf den Markt kommen wird.



Figur 10: Solarinnovation: über das in einem wettergeschützten Gehäuse untergebrachte Solar-Kompaktmodul heizen Solarkollektoren direkt das zirkulierende Warmwasser von Mehrfamilienhäusern. Dazu wird die Zirkulationsleitung vom obersten Geschoss bis aufs Dach verlängert. (Foto: Oekozentrum Langenbruck)

Die Low-Flow-Technik in Kompaktanlagen für die Wassererwärmung im Einfamilienhaus erlaubt den **Einsatz flexibler Verbindungsleitungen aus Kunststoff** [17] mit kleinen Durchmessern im Bereich bis zu 5 mm. Anstelle von Kupferrohren sind bereits Kunststoffleitungen auf Silikonbasis im Einsatz. Damit wird eine stark vereinfachte und raschere Installation möglich. Es sind allerdings

auch qualitative Nachteile gegenüber den traditionell verwendeten Kupferleitungen aufgetreten. Neu entwickelte Materialien auf Elastomerbasis haben bereits im Labor ihre Vorteile gegenüber den Silikonleitungen bewiesen. In einem Feldversuch wurden im Rahmen dieser Untersuchung Leitungen aus diesem Material eingesetzt und auf Ihre Beständigkeit untersucht. Die neuen Leitungen haben die Erwartungen vollumfänglich erfüllt und könnten damit eingesetzt werden. Die benötigten Mengen sind im Moment allerdings noch zu klein, um einen einheimischen Hersteller zu finden, der Leitungen aus diesem Material zu marktfähigen Preisen herstellen kann.



Figur 11: Verfärbte Silikonschläuche nach wenigen Betriebsjahren



Figur 12: Elastomer - Flextube nach 2 Betriebsjahren: die hohen thermischen Belastungen liegen im Bereich der ersten 30 cm. Von aussen sind keine Verfärbungen und Aushärtungen des Schlauches feststellbar. (Fotos: Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle, SPF)

L'installation avec stockage saisonnier de la SUVA [33] est en fonction depuis octobre 2003 (49 sondes de 160 m de profondeur). Les bâtiments sont alimentés soit par la pompe à chaleur (PAC), soit par le solaire en direct, soit par une chaudière d'appoint. Durant cette année complète de mesures, les besoins en chaleur du complexe ont été de 1'672 MWh, la PAC a fourni 74% de cette énergie à partir des rejets de chaleur, d'une part, et du stock souterrain lui-même rechargé par le solaire, d'autre part, la chaudière 23% et le solaire en direct 2%. La PAC a puisé 67% de son énergie dans le stock. C'est donc au final pour cette première année, un taux de 48% ($= 0,67 * 0,74 + 2\%$) solaire = 50% d'énergie renouvelable que l'installation a réalisé. Ce qui était l'objectif et constitue un résultat excellent compte tenu de la taille de l'objet

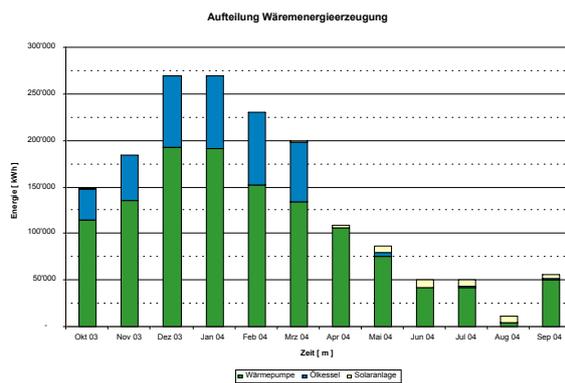


Figure 13: première année de mesures de l'installation solaire+stockage+pompe à chaleur de la SUVA, à Root. La source de la PAC est le plus grand stock souterrain de Suisse rechargé par une toiture solaire (Bureau Berchtold).

Évaluation de l'année 2004 et perspectives pour 2005

L'année **2004** a été marquée par des restrictions budgétaires et la fin du programme de projets P+D solaires. Les projets en cours se termineront, mais aucun nouveau n'a pu être soutenu ou lancé.

Les satisfactions sont venues du SPF, qui a maintenu son niveau de qualité et a publié les résultats de 10 combisystèmes testés au banc ; du déphaseur thermique du CUEPE de l'Université de Genève dont la faisabilité est désormais prouvée ; de l'installation avec stockage saisonnier SUVA qui après 1 année de service a atteint un des objectifs

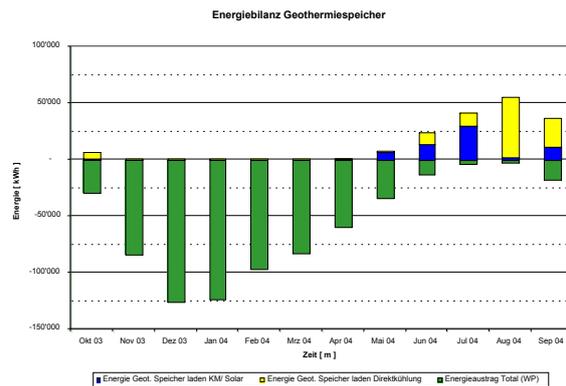


Figure 14: bilan du stock de la SUVA à Root durant la 1^{re} année. La recharge est inférieure au soutirage. Le niveau moyen de température du stock va décroître durant les premières années si la tendance continue (Bureau Berchtold)

Le coefficient de performance (COP) moyen annuel de la PAC a été de 2,9, grâce à son lien avec le stock qui touche une zone de terrain de 376'000 m³ ! Le déficit du stock en recharge est d'un facteur 4; ce qui est un peu élevé et qui sera corrigé à l'avenir, dans la mesure du possible. Plusieurs raisons de ce déficit sont connues: locaux partiellement occupés, température de consigne des 4 stocks tampons de 17 m³ trop élevée, pénalisant le captage solaire par les 660 m² d'absorbeurs non vitrés, qui n'ont délivré que 62 kWh/m² an. Au total, ce sont environ 250 MWh qui manquent et qui devront être produits en 2^e année en modifiant les réglages, sous peine de voir la température moyenne annuelle du stock souterrain chuter de plusieurs degrés.

Les résultats du projet P+D à Wollerau (36 sondes de 120 m) ont été décrits en détail dans le rapport 2003. En 2004, une **diffusion de ces résultats dans le bulletin ENET News** a été réalisée [34].

de 50% de renouvelable pour un grand complexe de bâtiments ; de la Tâche 32 du Programme SH&C de l'AIE qui est vraiment lancée malgré les difficultés inhérentes à un projet AIE qui ne dispose pas de financement dédié dans nombre de pays européens.

Le site Web de notre programme *Solaire actif chaleur et stockage de chaleur* a été maintenu à jour notamment avec les rapports des travaux de recherche (www.solararch.ch). Plus de 120 rapports y sont disponibles en téléchargement.

En septembre 2004, nous avons présenté le plan directeur de notre programme 2004-2007 à la CORE avec des objectifs chiffrés en matière d'amélioration des capteurs notamment. Ce plan directeur a été accepté et nous travaillerons en 2005 en respectant la vision énoncée devant la CORE [35].

Pour **2005**, il est prévu notamment:

- La poursuite des tests de capteurs et l'épuration de la base de données des capteurs aux seuls encore sur le marché, sans toutefois perdre l'historique du développement des performances des capteurs testés au SPF depuis plus de 15 ans.
- L'intégration des tests de combisystèmes dans l'offre de services du SPF sera réalisée. Il
- est peu probable que ce service soit payé par les fabricants (environ 15'000 CHF) si il n'y a pas une aide publique que le budget 2005 alloué au solaire ne semble pas permettre. Une mesure d'un appoint à bois pour les combisystèmes est demandé par l'industrie solaire et pourrait être réalisée si les moyens le permettent.
- La sortie de Polysun 4 par le SPF.
- Le dépôt de couches d'interférence sur un verre de 20 cm x 20 cm à l'EPF de Lausanne, et une étude de réalisation avec d'autres oxydes.
- Un pilote de déphaseur thermique contrôlé devrait pouvoir être construit par le CUEPE de l'Université de Genève.

Liste des projets de R+D

(RA) Rapport annuel 2004 existant

(RI) Rapport intermédiaire existant

(RF) Rapport final existant (voir www.energieforschung.ch)

Les rapports peuvent aussi être téléchargés à partir du site: <http://www.solarenergy-thermal.ch/>

- [1] A. Bohren, S. Brunold, SPF/ FH Rapperswil: **SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie, Teil A: Komponenten in solarthermischen Systemen** (RA 2004) <http://www.solarenergy.ch/>.
- [2] P. Vogelsanger, S. Laipple, M. Haller, S. Brunold, SPF/ FH Rapperswil: **SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie, Teil B: thermische Solarsysteme** (RA 2004) <http://www.solarenergy.ch/>.
- [3] S. Brunold, B. Füchslin, F. Flückiger, SPF/ FH Rapperswil: **SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie, Teil C: Materialien in thermischen Systemen** (RA 2004) <http://www.solarenergy.ch/>.
- [4] S. von Rotz, R. Chrenko, J. Marti, S. Brunold, SPF/ FH Rapperswil: **SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie, Teil D: Informatik** (RA 2004) <http://www.solarenergy.ch/>.
- [5] S. Brunold, SPF/ FH Rapperswil: **Vakuumtest für Solarabsorber** (RF 2004) <http://www.solarenergy.ch/>
- [6] B. Füchslin, S. Brunold, U. Frei, SPF/ FH Rapperswil: und T. Bürgenmeier, Tomsol GmbH: **Einsatz flexibler Verbindungsleitungen aus Kunststoff in der thermischen Solartechnik** (RF 2004) <http://www.solarenergy.ch/>.
- [7] Y. Allani, COGENER, Lausanne: **a) SPS: mini-centrale pilote électro-thermo-solaire de 10 kWél • Phase 5: industrialisation** (RF2003 attendu), http://www.cogener.ch/sps_index.htm. **• b) CEP: prospection de projet en Australie** (RF 2003) http://www.cogener.ch/sps_index.htm.
- [8] J. Remund, F. Dällenbach, Meteotest, Berne: **METEONORM Java plug-in für Polysun** (RF August 2004) <http://www.meteotest.ch>.
- [9] A. Schüler, E. de Chambrier, C. Roecker, J.-L. Scartezzini, LESO EPF Lausanne: **a) Capteurs solaires en couleur – Protocol of measurement techniques** – (RI August 2004) <http://www.lesowww.epfl.ch/>. **• b) Capteurs solaires en couleur, Phase II: Prototype fonctionnel** – (RA2004) **• c) J. Boudaden, UNI Basel: Development of nanostructured materials for solar technology: colored cover glazings for thermal solar collectors** – (RI August 2004) <http://www.unibas.ch/phys-esca/>.
- [10] M. Götz, M. Götz technologie douce, Neuchâtel: **Projet cuiseur solaire ultra-léger** – (RA2004) <http://www.cuisinesolaire.com>.
- [11] P. Gantenbein, SPF/ FH Rapperswil: **Sorptionsspeicher: Sorptionsmaterial – Studie Temperaturprofile & Sorptionsmodelle** (RA 2004) <http://www.solarenergy.ch/>.
- [12] P. Gantenbein, T. El Shafey, SPF/ FH Rapperswil: **Kühlung mit thermischer Solarenergie – Energiespeicherung & Klimatisierung mit dem Climatewell System** (RA 2004) <http://www.solarenergy.ch/>.
- [13] 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 2004) <http://www.leeedct.supsi.ch/urec.htm>.
- [14] P. Hollmuller, B. Lachal, J.-M. Zraggen, CUEPE Genève: **Déphaseur thermique diffusif** (RF Juin 2004) <http://www.unige.ch/cuepe>.
- [15] S. Citherlet, J. Bony, EIVD/LESBAT Yverdon: **CoSyPCM Combi-système avec Matériaux à changement de phase** (RA 2004) <http://igt.eivd.ch/lesbat/default.htm>.

- [16] 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 2004) <http://www.baseconsultants.com/IEA32>, www.iea-shc.org.

Liste des projets P+D

- [17] U. Frei, (ueli.frei@solarenergy.ch), SPF/ FH *Rapperswil: Einsatz flexibler Verbindungsleitungen aus Kunststoff in der thermischen Solartechnik (FLEXTUBE)*; <http://www.solarenergy.ch> (RF); Tests von flexiblen Kollektorleitungen erfolgreich abgeschlossen.
- [18] U. Frei, (ueli.frei@solarenergy.ch), SPF/ FH *Rapperswil: Prüfung von solaren Kombisystemen (KOMBI KOMPAKT+)*; <http://www.solarenergy.ch> (RF); 10 von 18 Anlagen haben den Test bestanden.
- [19] B. Salerno, (info@sesolar.ch), SALERNO ENGELER GMBH, *Langenbruck: Drain-Down-System für grosse Solaranlagen*; Anlage in Betrieb, Messungen laufen.
- [20] U. Muntwyler, (muntwyler@solarcenter.ch), MUNTWYLER ENERGIETECHNIK AG, *Zollikofen: Drain-Back-Kompaktanlagen* <http://www.solarch.ch>.
- [21] C. Hilgenberg, (christian.hilgenberg@iem.ch), INGENIEURBÜRO IEM AG, *Gwatt-Thun: Solarbetriebene Absorptions-Kältemaschine mit Heizungsunterstützung Berner Kantonalbank (BEKB) – Thun* <http://www.solarch.ch>; Anlage in Betrieb, Messungen laufen.
- [22] B. Sitzmann, (sitzmann@oekozenrum.ch), OEKOZENTRUM, *Langenbruck: Zirkulationseinbindung von solaren Warmwasseranlagen im MFH* (RF) <http://www.solarch.ch>; Ein marktreifes Produkt ist in Kürze verfügbar.
- [23] F. Beuchat, (beuchat@rmb.ch), REUST MARTI + BEUCHAT AG, *Zürich: Solarbetriebene Absorptions-Kältemaschine Migros-Genossenschafts-Bund (MGB)-Zürich*; Anlage in Betrieb, Messungen laufen.
- [24] C. Jobin, (agena.energies@bluewin.ch), AGENA ENERGIES SA, *Moudon: Détection des dysfonctionnements affectant les installations solaires pour l'eau chaude sanitaire et identification de leur origine* <http://www.solarch.ch>.
- [25] Y. Roulet, (roulet@energie-solaire.com), ÉNERGIE SOLAIRE SA, *Sierre: Camping du Botza: chauffage solaire de la piscine et de l'eau chaude* <http://www.solarch.ch>.
- [26] A. Messerli, (info@nena.ch), NEUENSCHWANDER-NEUTAIR AG, *Bern: Pfadiheim Weiermatt Köniz: Sanierung Wärmeversorgung* (RA) <http://www.solarch.ch>.
- [27] B. Sitzmann, (sitzmann@oekozenrum.ch), OEKOZENTRUM, *Langenbruck: Präsentation Symposium Staffelstein Solaranlageeinbindung via Warmwasserzirkulation*.
- [28] A. Primas, (aprimas@bhz.ch), BASLER & HOFMANN AG, *Zürich: Sanierung der Warmwasserversorgung Gemeinnützige Baugenossenschaft Zürich 7 (GBZ 7)*; (RF) Die Mehrheit der geplanten Anlagen sind erstellt, Messungen laufen.
- [29] A. Reinhard, (a.reinhard@prospective-concepts.ch), prospective concepts ag, *Glattbrugg: Hybride autonome Energieversorgung mit Photovoltaik, thermischen Sonnenkollektoren, Flüssiggas-Blockheizkraftwerk und Holz, Veytaux*; Anlagen in Betrieb, Messphase mit Betriebsoptimierung laufend.
- [30] L. Engeler, (info@sesolar.ch), SALERNO ENGELER GMBH, *Langenbruck: Solmat frostschutzmittelfreie Warmwassererwärmung* (Werkheim Sonnmatt – Langenbruck); Anlage in Betrieb, Messkampagne gestartet.
- [31] C. Fillieux, (chfillieux@bhz.ch), BASLER & HOFMANN AG, *Zürich: Entscheidungskonzepte unter Einbezug der optimalen Nutzung von Sonnenenergie*; Grundlagen erarbeitet, Gestaltung und Druck in Arbeit.
- [32] T. Bruttin, (thierry.bruttin@sierre.ch), VILLE DE SIERRE: *Complexe sportif Guillamo*; Anlage in Betrieb, Messkampagne gestartet.
- [33] P. Berchtold, E. Wirz, B. Engsig, T. Baumann, M. Frei, PB Büro *Sarnen: Geothermiespeicher SUVA D4 Unternehmens- und Innovationszentrum, Root (LU)* (RA 2004) <http://www.aramis-research.ch/e/14779.html>.

Références

- [34] D. Pahud, J.-C. Hadorn, H. Gorhan: Simulation für Heizen und Kühlen: *Erdwärmesonden des Projekts „Wollerau“ als Basis für Kühlenergieberechnungen*, ENET News 2/2004 (Art 2004) <http://www.leeedct.supsi.ch/urec.htm>.
- [35] J.-C. Hadorn: *Plan directeur 2004-2007 du programme Solaire actif chaleur et stockage de chaleur* (Présentation interne à la CORE).
- [36] Énergies renouvelables 6/04 de la SSES: *Chauffages solaires – Examen passé avec succès* (page 6-7).
- [37] J.-C. Hadorn: *Le stockage saisonnier du froid en recourant au milieu souterrain*, in *Le geocooling en Suisse*, Workshop Neuchâtel 16 octobre 2003, SSG SVG 5 mars 2004.
- [38] G. Branco, B. Lachal, P. Gallinelli, W. Weber: *Predicted versus observed heat consumption of a low energy multi-family complex in Switzerland based on long-term experimental data*, Energy and Buildings 36 (2004) 543-555, (présentation des résultats du projet P+D de la cité solaire de Plan-les-Ouates).

PHOTOVOLTAIK

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Stefan Nowak

stefan.nowak@netenergy.ch



15.4 kWp Flachdachintegration mit Sarnasol Photovoltaik Elementen

Beim Centro Professionale in Trevano (CPT) wurden bei der im Jahr 2003 durchgeführten Flachdachsanierung als dichte Dachhaut multifunktionale *Sarnasol* Photovoltaik-Module mit einer Gesamtleistung von 15.4 kWp eingesetzt. Die von *Sarnafil* entwickelten PV-Elemente bestehen aus der Kombination von flexiblen Dünnschichtzellenmodulen mit einer dichten Kunststoffolie. Durch die direkte Flachdachintegration der Elemente wird eine traditionelle Haltekonstruktion für die Befestigung der PV-Module eingespart. (Bauherr: *Centro Professionale (CPT)*, PV-Planer: LEEE-TISO, Bildquelle: *Sarnafil*).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Jahr 2004 stand für das Programm *Photovoltaik* (PV) unter dem Zeichen der im Entlastungsprogramm 2003 des Bundes beschlossenen Sparmassnahmen. Während der Einfluss dieser Massnahmen im Bereich der Forschung bisher in Grenzen gehalten und durch eine breite Abstützung des Programms zum Teil aufgefangen werden konnte, mussten im Bereich der P+D-Projekte empfindliche Einschnitte hingenommen werden. Dies erfolgt zu einem Zeitpunkt, wo die industrielle Umsetzung und die Anwendung neuer Lösungen an Schwung gewonnen hat und gefährdet damit die nachhaltige Wirkung der langjährigen Entwicklung. Angesichts dieser Ausgangslage galt es im Berichtsjahr um so mehr, für einige der viel versprechenden Entwicklungen im Bereich der Solarzellen konsequent nach Wegen zur industriellen Umsetzung zu suchen. Das bedeutende Wachstum des internationalen Photovoltaik-Marktes bildet denn auch – trotz des stagnierenden nationalen Markts – die Grundlage für den weiteren Ausbau einer wachsenden Photovoltaik-Industriebasis in der Schweiz.

Dementsprechend verfolgte das Programm *Photovoltaik* weiterhin eine ausgeprägte internationale Ausrichtung. Laufende Aktivitäten in Forschung und Entwicklung sowie noch bestehende Projekte im Bereich von Pilot- und Demonstrationsanlagen umfassen im Berichtsjahr 2004 rund 76 Projekte, wobei alle bekannten Projekte mit einer Förderung der öffentlichen Hand berücksichtigt sind. Entsprechend dem von der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE genehmigten **Forschungskonzept Photovoltaik 2004 – 2007** [50] ist das Programm *Photovoltaik* in folgende Bereiche gegliedert:

Solarzellen der Zukunft

Die Arbeiten zu **Dünnschicht Solarzellen** waren im Berichtsjahr weiterhin fokussiert auf die Schwerpunkte **Silizium** (amorph, mikrokristallin), Zellen auf der Basis von **Verbindungshalbleitern** (CIGS) sowie **Farbstoffzellen**. Neue Produktionsprozesse stehen besonders bei den Silizium Dünnschicht Solarzellen im Vordergrund. Solarzellen auf flexiblen Substraten gewinnen zunehmend an Bedeutung. Die industrielle Umsetzung wurde im Bereich der Solarzellen mit besonderem Nachdruck verfolgt.

Module und Gebäudeintegration

Die **Integration der Photovoltaik** im bebauten Raum bildet nach wie vor den wichtigsten Schwerpunkt der angestrebten Anwendungen.

Währenddem 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. 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. Die bessere Vorhersage des **Energieertrags** von Solarmodulen ist dabei ein Teilziel, welches 2004 mit Nachdruck verfolgt wurde. Die Überarbeitung der **Normen** für die Installation von netzgekoppelten PV-Anlagen an Gebäuden sollte im Berichtsjahr abgeschlossen werden. Für **Inselanlagen** wächst die Bedeutung der Kombination mit anderen Energietechnologien in Hybridanlagen.

Ergänzende Projekte und Studien

In diesem Bereich werden u.a. Fragen im Zusammenhang mit **Umweltaspekten** der Photovoltaik behandelt. Im Weiteren werden hier Projekte verfolgt, welche für allgemeine Konzepte, die Planung und den Anlagenbetrieb moderne **Hilfsmittel** bereitstellen. Neuste Technologien des Internets, Computermodelle und Bildverarbeitung bis hin zur Satellitenkommunikation gelangen dabei zum Einsatz. Für Anwendungen in **Entwicklungsländern** sind dagegen nicht-technische Aspekte von grösster Bedeutung.

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 fortgesetzt werden. Von besonderem Interesse waren im Berichtsjahr die Vorbereitungen für eine europäische Photovoltaik Technologie-Plattform.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

ZELL-TECHNOLOGIE

Die **grosse Bandbreite der Schweizer Solarzellenforschung** konnte im Berichtsjahr 2004 dank der breiten Abstützung dieser Forschung mit Erfolg fortgesetzt werden. Im Berichtsjahr gewannen insbesondere Industrie-Projekte mit Unterstützung der KTI weiter an Bedeutung. Die Beteiligung an EU-Projekten bildete eine weitere wichtige Komponente, wobei hier bei den Dünnschichtsolarzellen ein durch die Europäische Kommission bedingter, momentaner Rückgang zu verzeichnen ist.

Dünnschicht Silizium

Die Entwicklungen im Bereich des Dünnschicht Siliziums finden an der Universität Neuchâtel (IMT), an der EPFL (CRPP), der EIAJ (Le Locle), dem NTB (Buchs) sowie bei den Unternehmen *Unaxis Solar* (Trübbach, Neuchâtel) und *VHF Technologies* (Yverdon) statt und stellen einen wichtigen Schwerpunkt des Photovoltaik Programms dar. Das IMT schloss beim Projekt zu **Silizium Dünnschichtsolarzellen** [1a] im Berichtsjahr eine weitere, durch wichtige Änderungen gekennzeichnete Projektphase ab: seit Herbst 2004 hat Prof. Christophe Ballif die Nachfolge von Prof. Arvind Shah angetreten; Prof. Shah bleibt dem IMT mit seiner langjährigen Erfahrung auch im Jahr 2005 erhalten. Damit war das Jahr 2004 einerseits durch die Sicherung der Kontinuität und des Know-hows in wissenschaftlich-technischen Fragen gekennzeichnet, andererseits durch die Definition der künftigen Forschungsausrichtung und letztlich durch die zielgerichteten Arbeiten zur industriellen Umsetzung der bisherigen Forschung geprägt. Letztere war auf die Zusammenarbeit mit den Unternehmen *Unaxis* und *VHF-Technologies* konzentriert. Im Vordergrund der Arbeiten im Rahmen des BFE-Projektes stehen die Schlüsselfaktoren, welche die Führungsposition des IMT im wissenschaftlichen Umfeld des Dünnschichtsiliziums auszeichnen. Dies betrifft den Wirkungsgrad der Solarzellen, die Depositionsgeschwindigkeiten und die optische Absorption sowie die transparenten Oxydschichten (TCO) zur optimalen Lichtstreuung. Die Resultate in den einzelnen Arbeitsbereichen können wie folgt zusammengefasst werden: Für mikrokristalline ($\mu\text{c-Si:H}$) Solarzellen in p-i-n Schichtabfolge konnte das TCO für den Front-Kontakt in Hinsicht auf den Kurzschlussstrom der Solarzelle optimiert werden. Für mikrokristalline Solarzellen in n-i-p Schichtabfolge wurde auf Glas ein Anfangswirkungsgrad

von 9%, auf texturiertem Kunststoff PET ein solcher von 7% erreicht. Mikromorphe Tandemzellen erreichten in der n-i-p Konfiguration auf Glas 9.2%. Weitere Arbeiten konzentrierten sich auf ZnO als TCO-Material sowie auf neue spektroskopische Messmethoden zur Charakterisierung von Solarzellen.

In einem neuen KTI-Projekt wird in Zusammenarbeit mit *Unaxis* auf der Grundlage der KAI Plasmadepositionsanlagen dieses Unternehmens der **Prozess der schnellen Abscheidung von mikrokristallinem Silizium** [1b] entwickelt. Damit wird die Grundlage für den grossflächigen (1.4m^2), industriellen Prozess für mikromorphe Solarzellen gelegt. Auf der Versuchsanlage konnten bereits mikrokristalline Silizium Solarzellen mit 5.5% Wirkungsgrad bzw. mikromorphe Solarzellen mit einem solchen von 9.2% hergestellt werden. In einem verwandten neuen KTI-Projekt erarbeitet das CRPP an der EPFL zusammen mit *Unaxis* einen neuen, grossflächigen **VHF-Reaktor für die Abscheidung von amorphen und mikrokristallinen Siliziumsolarzellen** [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. Erste Arbeiten betreffen das Design des Reaktors, insbesondere die Form der Hochfrequenzelektroden, sowie die Prozessparameter. Mehr in die analytische Richtung orientiert, entwickelt das NTB in Buchs in einem weiteren neuen KTI-Projekt zusammen mit *Unaxis* ein auf die industrielle Produktion ausgerichtetes, spektral aufgelöstes **Photostrom Messgerät** (*Spectral Response Measurement System SRMS*) [3]. Erste Arbeiten betreffen das Hardware-Design und die PC Steuerung. Diese verschiedenen KTI-Projekte bilden zusammen mit dem laufenden BFE-Projekt die Grundlage für die industrielle Umsetzung in Hinsicht auf Produktionsanlagen für Silizium-Dünnschichtsolarzellen durch *Unaxis* (Fig. 1).

Eine weitere, unabhängige Gruppe von Projekten befasst sich mit der Entwicklung und Herstellung von Silizium Dünnschichtsolarzellen auf Kunststoffsubstraten; von Seiten der Industrie wird dies durch das IMT spin-off Unternehmen *VHF-Technologies* in Yverdon unter der Marke *flexcell*[®] verfolgt. Die gesamte Fabrikationskette konnte inzwischen aufgebaut und erste kommerzielle Produkte (Ladegerät) am Markt vertrieben werden. Das BFE-Projekt zur Verbesserung der **Zu-**

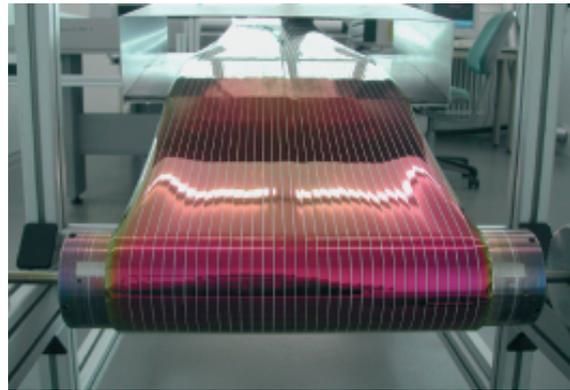
verlässigkeit von amorphen Solarzellen auf Polymer Substraten [4a] konnte im Berichtsjahr erfolgreich abgeschlossen werden. Für die aktuelle Produktionstechnologie wurden im Berichtsjahr in einem ergänzenden BFE-Projekt die Prozessgrundlagen für eine **Pilotproduktion** [4b] von 40 kWp/Jahr erarbeitet, in dem die wesentlichen Engpässe in der Produktion durch Erhöhung der Kapazität in den einzelnen Fabrikationsschritten erfolgreich beseitigt werden konnten (Fig. 2). Die Resultate der abgeschlossenen Arbeiten legten die Grundlage für eine weitere Investitionsrunde und die Erhöhung der Produktionskapazität. Ausserdem sollen die Eigenschaften dieser Solarzellen in Hinsicht auf Energieanwendungen weiter entwickelt werden.

Das IMT entwickelt dazu in einem neuen KTI-Projekt zusammen mit *VHF-Technologies* und weiteren Partnern die Verwendung von **nanostrukturierten optischen Gittern** [1c] zur Verbesserung der Eigenschaften von flexiblen Solarzellen auf Kunststoffsubstraten. Die nanostrukturierten Kunststoffsubstrate (PET, PEN) wurden durch OVD-Kinegram vorbereitet. Am IMT wurden auf texturierten PET Substraten amorphe Solarzellen mit 7% stabilem Wirkungsgrad hergestellt.

Ein früheres KTI-Projekt zwischen der EIAJ in Le Locle und *VHF-Technologies* untersuchte ebenfalls die Verwendung von **Nanostrukturen** [5], wobei diese durch Ätzprozesse auf Polyimidsubstraten hergestellt wurden. Dieses Projekt wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Während die beabsichtigten Strukturen erfolgreich hergestellt werden konnten, resultierte daraus noch nicht die erhoffte Erhöhung des Wirkungsgrades der Solarzellen.



Figur 1: Industrielle Plasma KAl-Depositionsanlage (Bildquelle Unaxis)



Figur 2: Roll-to-roll Produktion von amorphen Silizium Dünnschicht solarzellen (Bildquelle VHF)

Kristallines Silizium

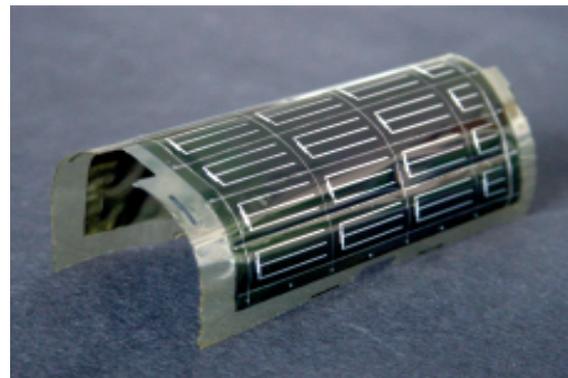
HCT Shaping Systems beteiligte sich am EU-Projekt **RE-SI-CLE** [6] zur Erarbeitung von neuen Prozessen, welche die Rezylierung von Rohsilizium aus Siliziumabfällen der Verarbeitungskette für die Wiederverwendung im Produktionsprozess anstrebte. Dies erfolgt vor dem Hintergrund des immer knapper werdenden Rohmaterials für kristalline Silizium Solarzellen. Das Projekt wurde im Berichtsjahr abgeschlossen.

Am PSI wurde im Berichtsjahr in Zusammenarbeit mit *HOVAL* das KTI-Projekt **HEAT** [7a] abgeschlossen. Es hatte zum Ziel, die Verwendung von Siliziumsolarzellen in einer Thermophotovoltaik-Anwendung für autonom betriebene Heizkessel zu entwickeln. Das PSI beteiligt sich zudem im Rahmen des neuen EU-Projektes **FULLSPECTRUM** [7b] auch an internationalen Arbeiten zum Thema der Thermophotovoltaik (TPV). **FULLSPECTRUM** ist eines der neuen Integrierten Projekte im Bereich der Photovoltaik und führt ganz unterschiedliche Ansätze zur besseren Nutzung des Strahlungsspektrums in einem Projekt zusammen (III-V *multijunctions*, TPV, *intermediate band cells*, molekulare Konzepte); dabei werden Wirkungsgrade bis zu 40% angestrebt.

II-VI Verbindungen (CIGS)

Die Gruppe Dünnschichtphysik an der ETHZ hat über einige Jahre EU-Projekte zum Thema Solarzellen auf der Basis von Verbindungshalbleitern (CIGS, CdTe) durchgeführt. Im Berichtsjahr wurde im BFE-Projekt **FLEXCIM** [8a] die Entwicklung von flexiblen CIGS-Solarzellen weiter vorangetrieben. 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

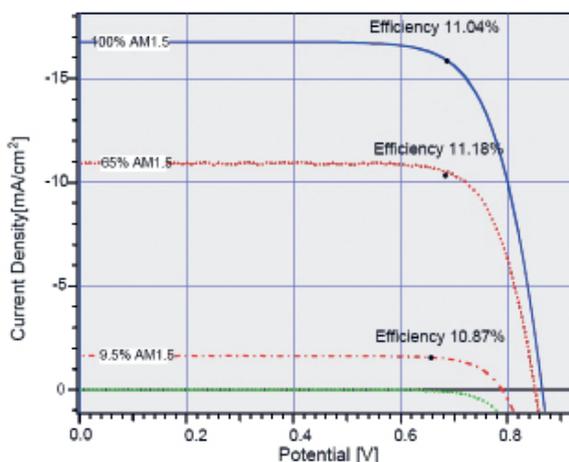
Wirkungsgrade von 10-12% regelmässig erreicht werden konnten. Auf Polyimid konnte aufgrund von optimierter Prozessführung ein neuer Weltrekord für den Wirkungsgrad von flexiblen Solarzellen auf Kunststoff von 14.1% erzielt werden; dieser Wert wurde durch unabhängige Messungen am Fraunhofer Institut für Solarenergieforschung (FhG-ISE) in Freiburg (D) ermittelt (Fig. 3). Durch eine Antireflexbeschichtung wird eine weitere Erhöhung auf 15% erwartet. Die Abscheidung der flexiblen CIGS-Solarzellen auf Substraten von 30 x 30 cm² befindet sich im Entwicklungsstadium. Das EU-Projekt **METAFLEX** [8b] zur Entwicklung eines *roll-to-roll* Prozesses wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Dabei konzentrierte sich die ETHZ-Gruppe auf die CIGS-Deposition auf Polyimid, Minimodule und die CIGS-Abscheidung bei Temperaturen unter 450°C. Im Berichtsjahr betrafen die Arbeiten insbesondere die Verwendung von Natrium im Depositionsprozess; dazu wurde eine spezielle Methode der *Post-Deposition* erfolgreich entwickelt und charakterisiert. Im EU-Projekt **NEBULES** [8c] wird das Thema neuer Pufferschichten für CIGS-Solarzellen weiter entwickelt. Hier konzentriert sich die ETHZ-Gruppe auf die strukturelle und elektronische Charakterisierung der Solarzellen in Abhängigkeit von verschiedenen hergestellten CdS-Pufferschichten. Im Berichtsjahr wurden die Grenzflächen dieser Schichten in Hinsicht auf Struktur und Zusammensetzung eingehend analysiert.



Figur 3: Flexible CIGS Solar-Zelle auf Polyimid Folie (Bildquelle ETHZ)

Farbstoffzellen

Die Entwicklung von farbstoffsensibilisierten, **nanokristallinen Solarzellen** [9a] wurde am ISIC der EPFL fortgesetzt. Im Berichtsjahr wurde die Farbstoffsynthese in Hinsicht auf die optischen Eigenschaften und den möglichen Temperaturbereich vorangetrieben. Im EU-Projekt **NANOMAX** [9b] sollten alternative Wege für die Farbstoff-Solarzelle untersucht werden, insbesondere mittels neuer Photoelektroden Konzepte und Materialien, neuer Farbstoffe, verbesserter Transporteigenschaften und reduzierter Rekombination der Ladungsträger. Das Projekt wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Während für das in der Vergangenheit immer wieder erwähnte Thema der Stabilität (über 1000 h, 60°C) ermutigende Resultate erarbeitet wurden, konnte der Wirkungsgrad noch nicht im erwünschten Ausmass (12 – 15%) erhöht werden. An der EPFL wurden dazu im Rahmen dieses Vorhabens unter einer AM 1.5 Referenzstrahlung Werte von 11% erreicht (Fig. 4).



Figur 4: I-V Kennlinien von Farbstoffsolarzellen (Bildquelle EPFL)

Zusammen mit *Greatcell Solar* wird in einem KTI-Projekt aufgrund von Vorarbeiten innerhalb des *TOP NANO 21* Programms die **technische Hoch-**

skalierung der Farbstoffzelle [9c] angestrebt. Mittels Nanotechnologie wird TiO₂ als halbleitender Film auf transparenten leitenden Substraten hergestellt. Die Leerlaufspannung und die Betriebstemperatur der Solarzelle sollen erhöht werden. Ein früheres *TOP NANO 21* Projekt, welches sich mit **flexiblen Farbstoffzellen** [9d] befasste, wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Im Vordergrund standen dabei als Substrat rostfreie Stahlfolien, auf welchen Farbstoffzellen als feste Heteroübergänge realisiert wurden. Dabei wurden Wirkungsgrade um die 3% erreicht. Das neue EU-Projekt **MOLYCELL** [9e] befasst sich mit flexiblen organischen Solarzellen, wobei sowohl vollständig organische wie hybride nanokristallin-organische Solarzellen untersucht werden. An der EPFL stehen letztere im Vordergrund, wobei dies auf der Grundlage von nanokristallinen Metalloxydfilmen auf Kunststoffsubstraten erfolgt. Die Solarzelle basiert auf einem festen Heteroübergang, dessen

Lichtabsorption einerseits durch molekulare Farbstoffe, andererseits durch Polymere beeinflusst werden soll.

Das LTC an der EPFL entwickelt auf der Grundlage der Farbstoffzellen in einem neuen KTI-Projekt zusammen mit *Konarka photovoltaisch aktive Textilien* [10]. Von dieser Entwicklung werden neuartige Photovoltaik-Anwendungen erwartet.

Antennen-Solarzellen

An der Universität Bern wurden die grundlegenden Arbeiten zu **Antennen-Solarzellen** [11] im Rahmen des Programms Solarchemie und mit Unterstützung des schweizerischen Nationalfonds weitergeführt. Unter Verwendung von farbstoffbeladenen Zeolith-Kristallen wird eine neue Variante farbstoffsensibilisierter Solarzellen angestrebt. Im Vordergrund dieser Grundlagenarbeiten steht die Organisation der Kristalle an der Grenzschicht zu einem Halbleitermaterial im Hinblick auf die elektronische Energieübertragung. Im Berichtsjahr wurden bezüglich der Funktionalität der Zeolith-Kristalle an ihren Enden und für die Herstellung dünner Zeolith-Kristalle Fortschritte erzielt.

SOLARMODULE UND GEBÄUDEINTEGRATION

Gebäudeintegrierte Anlagen stellen nach wie vor das wichtigste Anwendungsgebiet der Photovoltaik in der Schweiz dar. 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. Im Berichtsjahr wurde auf die Entwicklungen für die Integration von Dünnschicht Solarzellen und deren Bedingungen weiteres Gewicht gelegt.

Swiss Sustainable Systems (3S) untersuchte in einem BFE-Projekt die durch die Verwendung von geätztem **Antireflexglas** [12a] mögliche Leistungssteigerung von kristallinen Solarmodulen. Um die möglichen Effekte zu quantifizieren, wurden die Gläser wahlweise vor / nach der Lamination im Säurebad geätzt. Die Messungen an den mit diesem Glas hergestellten Solarmodulen zeigten in beiden Fällen eine systematische Leistungssteigerung von ca. 2%, wobei 3% erwartet wurden. Zusätzliche Effekte sind bei flachen Einstrahlungswinkeln möglich. Das EU-Projekt **AFRODITE** [12b] wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Dabei wurden unter Verwendung von rückkontaktier-

ten, kristallinen Solarzellen neue ästhetisch ansprechende Lösungen für die PV Gebäudeintegration erfolgreich entwickelt und früher als erwartet kommerzialisiert [51]. Dadurch reduzierten sich auch die vorgesehenen Aufgaben von 3S. Im neuen EU-Projekt **BIPV-CIS** [12c] 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.

Alcan Packaging beteiligte sich weiter am EU-Projekt **HIPROLOCO** [13], in welchem neue kostengünstigere Verfahren zur Einkapselung von Dünnschicht solarzellen in Modulen entwickelt werden. Dieses Projekt wurde im Berichtsjahr abgeschlossen.

Telsonic beteiligt sich am EU-Projekt **CONSOL** [14], in welchem die elektrische Kontaktierung von CIGS-Solarzellen optimiert werden soll. Als Technologien werden dazu elektrisch leitende Klebebänder und Ultraschall-Schweissen eingesetzt. Die wichtigen Messgrößen Adhäsion und Kontaktwiderstand werden in Funktion von Klimatests erfasst und für beide Technologien optimiert. Für *Telsonic* steht als Hersteller von entsprechenden Anlagen die Optimierung des Ultraschall-Schweissens im Vordergrund.

Der minimale Betrieb des Projektes **DEMOSITE** [15a] an der EPFL wurde im Berichtsjahr durch das LESO abgeschlossen. Es zeigt nebeneinander zahlreiche Varianten der Photovoltaik-Gebäudeintegration auf Flachdächern, Schrägdächern und Fassaden. Die Webseite <http://www.demosite.ch> erlaubt deren virtuellen Besuch und bietet zudem Weiterbildungsunterlagen für interessierte Architekten und andere Fachleute. Die weitere Verwendung dieser Demonstrationsanlagen ist seitens der EPFL noch nicht entschieden.

Verschiedene weitere neue Konzepte und Produkte zur Photovoltaik-Gebäudeintegration wurden im Rahmen von P+D-Projekten erprobt (siehe entspr. Kapitel).

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 die Sicherheit und Zuverlässigkeit künftiger Anlagen

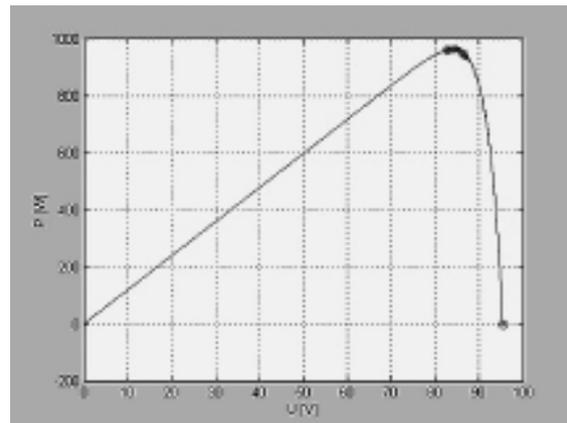
wie auch für die Standardisierung der Produkte von grosser Bedeutung. Besonders bei aktuellen Normen für Photovoltaiksysteme und der damit einhergehenden Qualitätssicherung war akuter Handlungsbedarf gegeben. Dieser Bedarf betrifft auch Komponenten für die Gebäudeintegration, für welche trotz wachsendem Markt noch keine verbindlichen Normen vorliegen.

Das LEEE-TISO an der SUPSI hat im Berichtsjahr seine Testmessungen an Solarmodulen in einem neuen Projekt **Centrale LEEE-TISO 2003-2006** [16a] fortgesetzt. Das gemäss ISO 17025 für Messungen zertifizierte Labor mit dem Sonnen-Simulator der Klasse A wurde erneut einem jährlichen Audit unterzogen und konnte seine Präzision von $\pm 1\%$ bestätigen. Im Berichtsjahr wurden mehr als 2100 I-V Kennlinien (Blitztests) gemessen, davon 270 für Dritte. Es wurden Vergleichsmessungen mit anderen zertifizierten Labors in Europa (ESTI-JRC und ECN) durchgeführt und ein vom NREL koordinierter internationaler *Round Robin Test* von Solarmodulen fortgesetzt. Die Resultate dazu werden im Verlauf von 2005 erwartet. Weitere Untersuchungen betrafen den Temperaturkoeffizienten einzelner Solarmodule, die Messung bei unterschiedlicher Einstrahlungsintensität sowie die Messung von I-V Kennlinien im Fall von Solarzellen mit kapazitiven Eigenschaften. Für die Ausmessungen der Solarmodule wird die Messelektronik neu konzipiert (Fig. 5). Entsprechend der Strategie des LEEE soll in Zukunft als neues Thema auch die Photovoltaik-Gebäudeintegration verstärkt bearbeitet werden.

Das LEEE-TISO ist Partner im EU-Projekt **PV Enlargement** [16b], welches ein europaweites Demonstrationsprojekt in 10 Ländern (5 davon in Osteuropa) mit 32 Anlagen von insgesamt 1.14 MWp Leistung darstellt. Ende 2004 waren davon



Figur 5: TISO PV-Modulteststand
 (Bildquelle LEEE TISO)



Figur 6: Automatisierte Bestimmung des Wechselrichter Maximum Power Points MPP (Bildquelle HTI Burgdorf)

insgesamt 12 Anlagen mit 712 kWp in Betrieb. Dabei ist das LEEE-TISO für die wissenschaftliche Begleitung, insbesondere für Kalibrierungsaufgaben der verwendeten Messsysteme und Performance-Messungen der verwendeten Solarmodule, zuständig. Seit Projektbeginn im Januar 2003 wurden 97 Solarmodule verschiedener Technologien (c-Si, a-Si, CIS, CdTe) und Hersteller geprüft. Bei den kristallinen Zellen wiesen rund die Hälfte der 53 Module Abweichungen von der Nennleistung auf. Die grösste negative Abweichung betrug -9.4% ; andererseits wies ein speziell für die Gebäudeintegration bestimmtes Modul eine positive Abweichung von $+9.6\%$ auf. Bei den Dünnschichtmodulen wurden die Toleranzen bei der Nennleistung im Allgemeinen eingehalten.

Am Photovoltaiklabor an der FH Burgdorf wurde das Projekt **Photovoltaik-Systemtechnik PV-SYTE** [17] fortgesetzt. Die Steuer- und Mess-Software für den Solargenerator-Simulator wurde in den Jahren 2003 und 2004 für halbautomatische Tests stark verbessert (Fig. 6). Zur Gewinnung von Testresultaten von neueren Wechselrichtern erfolgten 2004 ausgedehnte Tests an einigen neuen Geräten (*Sunways NT4000*, *Fronius IG 30* und *IG 40* sowie *Sunny Mini Central 6000* von *SMA*). Dabei wurden auf nunmehr 23 Leistungsstufen alle U, I und P auf der DC- und AC-Seite, der DC-AC-Umwandlungswirkungsgrad η , der statische MPP-Tracking-Wirkungsgrad η_{MPP} , die Oberschwingungsströme und der $\cos \varphi$ auf der entsprechenden Leistungsstufe gemessen. Im Laufe von 2004 wurde zudem die neue Grösse *totaler Wirkungsgrad* η_{tot} eingeführt, die eine noch bessere Charakterisierung des Verhaltens von Netzwechselrichtern ermöglicht. Einige der getesteten Wechselrichter weisen gegenüber früheren Geräten eine deutliche Steigerung des Umwandlungs-

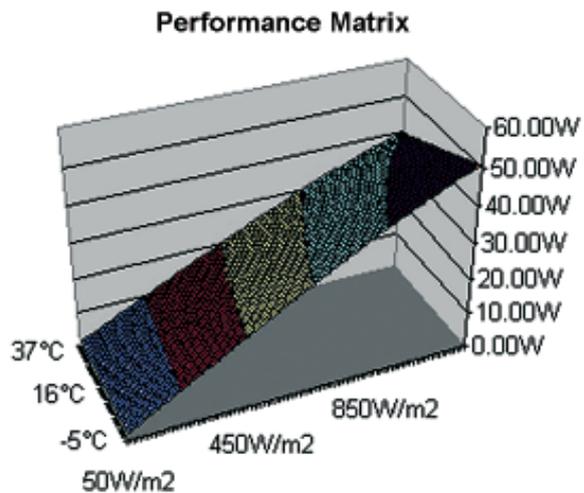
wirkungsgrades auf, der zudem oft deutlich von der verwendeten DC-Spannung abhängt. Um für zukünftige Tests zwei computergesteuerte Simulatoren zur Verfügung zu haben, wurde im Jahre 2004 auch die Steuerelektronik des kleinen Simulators (7,5 kW / 12 A) komplett überarbeitet und der Arbeitsspannungsbereich von 75 V bis 750 V auf 20 V bis 800 V erweitert. Im Rahmen dieses Projektes wurde auch das Langzeit-Monitoring der im vorangegangenen Projekt gemessenen Anlagen mit insgesamt 55 Wechselrichtern fortgesetzt.

Enecolo schloss im Berichtsjahr das Projekt **Energy Rating von Solarmodulen** [18a] zusammen mit Partnern im In- und Ausland weitgehend ab. Als Basis dient die Performance-Matrix eines Solarmoduls (Fig. 7). Die Performance-Matrix wurde aus verschiedenen experimentellen Methoden ermittelt und in ihren Eigenschaften analysiert und verglichen. Dabei ist die hohe Qualität und breite Verteilung der Messdaten für eine aussagekräftige Performance-Matrix von Bedeutung. Während damit die für die Erstellung der Performance-Matrix notwendigen Erkenntnisse vorliegen, ist die Präzision der Aussagen in Hinblick auf das Energierating der Solarmodule noch nicht zufriedenstellend und eindeutig.

Solaronix ist am EU-Projekt **EURO-PSB** [19] zur Entwicklung einer Polymer Solar Batterie beteiligt. Es handelt sich dabei um eine kleine, selbstaufladende Batterie für mobile Anwendungen (Fig. 8). Das Prinzip baut auf der Kombination einer neuartigen Polymer Solarzelle (organische Solarzelle) und einer wiederaufladbaren Lithium-Polymerbatterie auf. *Solaronix* ist in diesem Projekt für die elektrische Verbindungstechnik zwischen Solarzelle und Batterie sowie den gesamten Verbund zuständig. Es wurden dazu im Berichtsjahr entsprechende Lösungen erarbeitet und ein Niederspannungskonverter mit kombinierter Ladereglerfunktion entwickelt. Amorphe Siliziumsolarzellen erwiesen sich dabei als besonders geeignet.

ERGÄNZENDE PROJEKTE UND STUDIEN

Das LESO an der EPFL beteiligt sich am EU-Projekt **SUNtool** [15b], welches ein allgemeines Modellierungswerkzeug zur Nachhaltigkeit im urbanen Kontext darstellt. Es soll typischerweise eine Gruppe von Gebäuden bis zu einem Stadtviertel (< 1 km²) energetisch und stoffflussbezogen abbilden können. Das Werkzeug baut auf umfassenden Modellen zu den einzelnen Aspekten auf und soll diese mit einem graphischen Benutzerinterface zusammenführen. Die EPFL entwickelt dazu entsprechend stochastische Benutzungsmodelle und hat diese zum Teil bereits validiert. Die Gemein-



Figur 7: Performance Matrix eines Solarmoduls (Bildquelle Enecolo)



Figur 8: Beispiel einer Anwendung der Polymer Solar Batterie (Bildquelle Varta)

den Lausanne und Morges nehmen dazu auch als Lieferanten von Informationen und Daten teil.

Enecolo ist am EU-Projekt **PVSAT2** beteiligt [18b]. In diesem Projekt soll die satellitengestützte Performance Überwachung weiterentwickelt werden, indem einerseits präzisere Satellitendaten verwendet werden und andererseits die Produktionsdaten der PV-Anlagen zentral erfasst werden. Insgesamt soll dadurch ein zuverlässiges und kosteneffizientes System zur Überwachung von kleinen Photovoltaik-Anlagen entstehen, für welche eine Messdatenerfassung vor Ort zu aufwendig wäre. Im Berichtsjahr wurde vor allem die Strahlungsumrechnung verbessert und ein Entscheidungssystem entwickelt, welches allfällige Fehler beim Betrieb der Photovoltaik-Anlagen detektieren kann. *Enecolo* ist auch am verwandten Pro-

jekt der esa **ENVISOLAR** [18c] beteiligt. In diesem Vorhaben sollen die der esa zur Verfügung stehenden Daten aus der Erdbeobachtung markt-orientiert (<http://www.eomd.esa.int>) verarbeitet werden, insbesondere in Hinsicht auf das Thema *Solarstrahlung für Energieanwendungen*.

Das CUEPE an der Universität Genf beteiligt sich am EU-Projekt **Heliosat 3** [20] zur energiespezifischen Bestimmung der Solarstrahlung aus Meteosat-Daten. *Heliosat3* nutzt u.a. die neuen Meteosat Second Generation (MSG) Satelliten und erarbeitet Solarstrahlungsdaten mit höherer Auflösung in zeitlicher, räumlicher und spektraler Hinsicht. Diese Daten können die Entscheidungsgrundlagen für Investitionen, Planung und Management im Solarenergiebereich verbessern. Als mögliche Anwendungsbeispiele im PV-Bereich werden Standortoptimierung, Anlagen- und Netzmanagement genannt (s. auch *ENVISOLAR*). Es konnte gezeigt werden, dass ab einer Distanz von ca. 20-25 km zur nächsten Meteostation die aus den Satellitendaten errechnete Solarstrahlung präziser ist. Das Projekt wird anfangs 2005 mit einem Workshop abgeschlossen (Fig. 9).

Das LEEE-TISO und *Solstis* sind Partner im neuen EU-Projekt **PV-Catapult** [16c, 21]. Dieses Querschnittprojekt hat zum Ziel, in verschiedenen strategischen Bereichen der Photovoltaik, sowohl in Forschung, Umsetzung wie Markt, entsprechende Aktionen zur Marktbeschleunigung zu identifizieren und auszulösen. Unter anderem soll dazu eine SWOT-Analyse der europäischen Photovoltaik durchgeführt werden. Das LEEE-TISO bearbeitet in diesem Projekt Fragen der Performanzmessungen und –voraussage während sich *Solstis* an einer Roadmap für das Thema des PV-thermischen Hybridkollektors beteiligt.

Ein symbolträchtiges Projekt stellt das von Bertrand Piccard und verschiedenen Partnern getragene Vorhaben **Solarimpulse** [22] dar. Das Ziel dieses Projekts ist die ununterbrochene Weltumrundung mit einem photovoltaisch betriebenen Flugzeug (Fig. 10). Das Projekt ist eine grosse Herausforderung in Hinsicht auf Material und Design sowie insbesondere auf die Energieversorgung und das Energiemanagement unter extremen Bedingungen (z.B. UV-Strahlung, Feuchtigkeit, Temperaturen, Frost, Alterung, mechanische Vibrationen). Die photovoltaische Energieversorgung des Flugzeugs und ein äusserst sparsamer Energieeinsatz müssen dabei genügend Energie für den momentanen Antrieb, die Heizung des Flugzeugs und die Speicherung in Hinsicht auf den Nachtflug bereitstellen. In diesem Projekt nimmt die EPFL die Rolle des wissenschaftlichen Beraters wahr und arbeitet dazu mit weiteren Stellen im In- und Ausland zusammen.



Figur 9: *Heliosat 3* (Bildquelle Eumetsat)



Figur 10: Photovoltaisch betriebenes Flugzeug (Bildquelle Oxyde.ch – Sapisiti / ©EPFL Solar Impulse)

INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT IEA, IEC, PV-GAP

Die Beteiligung am Photovoltaikprogramm der IEA (IEA PVPS) wurde im Berichtsjahr mit Kontinuität fortgesetzt, sowohl auf der Projektebene wie im *Executive Committee (ExCo)* [52]. Die Schweiz hält weiterhin den Vorsitz dieses weltweiten Programms inne. Im Berichtsjahr wurde die Zusammenarbeit mit der Industrie verstärkt und die Europäische Photovoltaik Industrie Vereinigung EPIA konnte neu als Sponsormitglied gewonnen werden. Ausführliche Informationen zu den Aktivitäten und Resultaten von IEA PVPS sind auf der Webseite <http://www.iea-pvps.org> zu finden.

Nova Energie vertritt die Schweiz in Task 1 von IEA PVPS, welcher allgemeine **Informationsaktivitäten** [23] zur Aufgabe hat. Im Berichtsjahr wurde ein weiterer nationaler Bericht über die Photovoltaik in der Schweiz bis 2003 [53] erstellt; auf dieser Grundlage wurde die 9. Ausgabe des jährlichen internationalen Berichtes (Fig. 11) über die Marktentwicklung der Photovoltaik in den

IEA-Ländern erstellt [54]. Dieser Bericht wurde im Berichtsjahr insbesondere auch für die aktuellen Analysen der Photovoltaik durch den Finanzsektor (*Bank Sarasin, Credit Lyonnais*) verwendet [55, 56]. Im Berichtsjahr wurde anlässlich der 19. Europäischen Photovoltaik-Konferenz in Paris unter Schweizer Führung ein Workshop mit der Industrie organisiert. Der *IEA PVPS-Newsletter* [57] informiert regelmässig über die Arbeiten in und rund um das IEA-Programm.

In IEA PVPS Task 2 über **Betriebserfahrungen** [24] stellt *TNC* den Schweizer Beitrag. Im Berichtsjahr wurde dieses Projekt unter der Führung Deutschlands für eine weitere Arbeitsphase 2004-2007 verlängert und umfasst nun 11 teilnehmende Länder (inkl. Europäische Kommission, Polen ist neu permanenter Beobachter). Als wichtiges neues Thema figurieren wirtschaftliche Aspekte der Photovoltaik. Die PVPS-Datenbank *Performance Database* [58] wurde mit neuen Daten ergänzt und umfasst nun 414 Photovoltaik-Anlagen aus 21 Ländern mit insgesamt rund 15'000 Monats-Betriebsdaten und 12 MWp Anlagenleistung. Aus der Schweiz sind 64 Anlagen in der Datenbank enthalten. Im Jahr 2004 wurden zwei neue Berichte zu Performance und Einstrahlungsdaten fertiggestellt [59, 60].

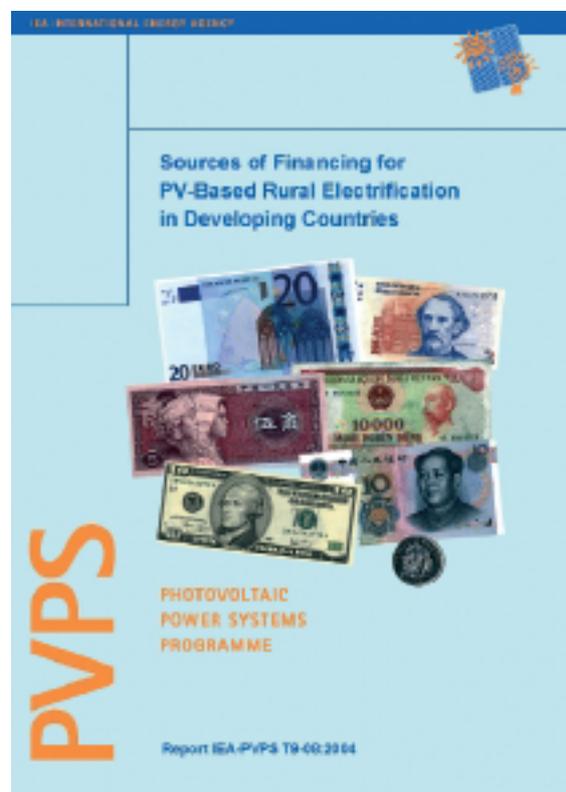
Dynatex beteiligt sich an den Arbeiten in IEA PVPS Task 3 über **Inselanlagen** [25]. Schwerpunkte der Aktivitäten dieses Projektes bilden die Qualitätsverbesserung und die Zuverlässigkeit von autonomen Photovoltaik-Anlagen sowie technische Fragen in hybriden Systemen und Batterien. Das Projekt wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Im Jahr 2004 wurden die letzten Berichte zur Auswahl von Bleibatterien sowie zu alternativen Speichersystemen publiziert [61–63].

Im Rahmen der interdepartementalen Plattform (*seco, DEZA, BUWAL, BFE*) zur Förderung der erneuerbaren Energien in der internationalen Zusammenarbeit *REPIC* (<http://www.replic.ch>) leistet *entec* den Schweizer Beitrag zu IEA PVPS Task 9 über die **Photovoltaik-Entwicklungszusammenarbeit** [26a]. Dieses Projekt trat im Berichtsjahr in eine neue Arbeitsphase 2004-2008. Die Schweiz ist in diesem Projekt für die Koordination der Arbeiten mit multilateralen und bilateralen Organisationen verantwortlich. Im Berichtsjahr wurde im Rahmen dieses Projektes ein Bericht zur Finanzierung ländlicher Elektrifizierung mit Photovoltaik publiziert [64] (Fig. 12).

Alpha Real vertritt die Schweiz im TC 82 der IEC und leitet die Arbeitsgruppe, welche internationale **Normenvorschläge** [43] für Photovoltaiksysteme vorbereitet und verabschiedet. *Alpha Real*



Figur 11: IEA PVPS International Survey Report



Figur 12: IEA PVPS Task 9 Bericht zur Finanzierung ländlicher Elektrifizierung mit Photovoltaik

beteiligt sich ausserdem an *PV-GAP* (PV Global Approval Program), einem weltweiten Programm zur Qualitätssicherung und Zertifizierung von Photovoltaik-Systemen.

Das EU-Projekt **PV-EC-NET** [26b] ist ein Netzwerk von nationalen Photovoltaik Programmkoordinationsstellen, an welchem sich 14 Länder beteiligten (<http://www.pv-ec.net>). Das Projekt wurde 2004 mit einer Roadmap abgeschlossen. Das ergänzende EU-Projekt **PV-NAS-NET** [26c] befasst sich mit der Analyse der Situation der Photovoltaik in den neuen Mitgliedsländern der EU und führt ähnliche Arbeiten wie das Projekt *PV-EC-NET* durch (<http://www.pv-nas.net>). Im Berichtsjahr wurde dazu ein

Überblicksbericht publiziert, welcher Photovoltaik-Forschungsaktivitäten und die Marktsituation in diesen Ländern darstellt. Durch diese Projekte entsteht eine ausgezeichnete Übersicht über die verschiedenen Ansätze und Aktivitäten, aber auch über Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten. 2004 begann das neue EU-Projekt **PV-ERA-NET** [26d], welches Programmkoordinationsstellen und verantwortliche Ministerien aus 11 Ländern unter dem ERA-NET Schema zusammenführt (<http://www.pv-era.net>). Im Verlauf dieses Projektes soll die Zusammenarbeit zwischen den Europäischen Photovoltaikprogrammen verstärkt und in ausgewählten Gebieten gemeinsame Aktivitäten ausgelöst werden.

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 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 BBW bzw. dem neuen Staatssekretariat für Bildung und Forschung SBF, der KTI, dem BUWAL, der DEZA und dem seco sowie aus der Elektrizitätswirtschaft dem VSE, dem PSEL 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 2004 waren es 20 Projekte im 5. bzw. 6. Rahmenforschungsprogramm der EU. Ein weiteres Projekt fand mit der esa statt. Die Schweizer Photovoltaik konnte sich relativ erfolgreich an den ersten Ausschreibungen im 6. Rahmenforschungsprogramm der EU beteiligen. Es findet ein regelmässiger Kontakt mit Programmverantwortlichen in EU-Ländern statt, ebenso mit den zuständigen Einheiten bei der Europäischen Kommission.

Eine neue, wichtige Entwicklung fand mit den Vorarbeiten in Hinblick auf eine Europäische Photovoltaik Technologie Plattform statt. Technologie Plattformen sind ein neues Instrument der EU, mit welcher Forschung, Industrie und weitere

Kreise in strategisch wichtigen Gebieten in einer gemeinsam getragenen Initiative eingebunden sind und stärker zusammenarbeiten sollen. Der Programmleiter Photovoltaik konnte in der Eigenschaft als Vorsitzender des IEA PVPS Programms an den Arbeiten des *Photovoltaic Technology Research Advisory Council* (PV-TRAC) teilnehmen. Dieser Beirat der Europäischen Kommission erarbeitete im Verlauf von 2004 einen Bericht mit einer Vision für die Photovoltaik im Jahr 2030 [65], welche im September 2004 vorgestellt wurde. Es wird erwartet, dass die Photovoltaik Technologie Plattform 2005 operativ wird und insbesondere in Hinblick auf das 7. Rahmenforschungsprogramm der EU Wirkung entfalten kann.

Weitere Kontakte wurden mit internationalen Stellen mit Bedeutung für die Entwicklungszusammenarbeit gepflegt (Weltbank, GEF, IFC, UNDP, GTZ, KfW u.a.). Die Schweizer Photovoltaik ist angesichts dieser zahlreichen Wechselwirkungen international weiterhin sehr präsent.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Das Entlastungsprogramm 2003 des Bundes hatte auf das Photovoltaik P+D-Programm einschneidende Auswirkungen. Stieg die Anzahl der aktiven Projekte im Jahr 2003 im Photovoltaik P+D-Bereich leicht auf gut 45 Projekte an, wurden im Berichtsjahr insgesamt rund 35 Projekte begleitet. Anfang 2005 betrug die Zahl der aktiven Projekte noch 25. Aufgrund der aktuellen Budgetsituation im PV P+D-Bereich ist die Unterstützung neuer Projekte vorderhand nicht mehr möglich.

Die P+D-Aktivitäten verteilten sich im Berichtsjahr auf die Sektoren Pilotanlagen, Studien und Hilfsmittel, Messkampagnen und Komponentenentwicklung. Die pilotmässige Erprobung neuer Komponenten bei P+D-Anlagen im Massstab 1:1 bildete auch dieses Jahr einen klaren Schwerpunkt. Thematisch vertreten bleibt weiterhin hauptsächlich die **Photovoltaik Gebäudeintegration**.

Aktuell befassen sich diverse PV P+D-Projekte mit den Einsatz- und Anwendungsmöglichkeiten verschiedener Dünnschichtzellentechnologien. Bei mehreren Projekten wird die Eignung neuer Module dieses Typs für die Photovoltaik-Gebäudeintegration untersucht. Die bisherigen Erfahrungen belegen die positiven Eigenschaften einiger PV-Elemente mit Dünnschichtzellen für die direkte Integration in thermisch isolierte Dächer und Fassaden ohne Hinterlüftung der Module.

NEUE P+D-PROJEKTE

Im Berichtsjahr 2004 konnten im P+D Programm aufgrund des Entlastungsprogramms 03 des Bundes **keine neuen P+D-Projekte** mehr begonnen werden. Damit wird es verschiedenen Schweizer Firmen zunehmend erschwert, Erfahrungen mit neuen Produkten im Ersteinsatz zu sammeln, oder neue Entwicklungen anzugehen, die zum Erhalt der internationalen Konkurrenzfähigkeit im Photovoltaikbereich beitragen. Während sich der PV-Weltmarkt seit Jahren mit Wachstumsraten von jährlich 30 bis 40% entwickelt, stagniert der Schweizer Markt seit über 5 Jahren bei ca. 2 MWp pro Jahr. Diversen Schweizer Firmen fehlen damit einerseits mindestens teilweise die Erfahrungen mit neuen Produkten, und andererseits die Erfahrungen im Massengeschäft. Damit besteht für diverse in der Schweiz ansässige Firmen die Gefahr, gegenüber der ausländischen Konkurrenz ins Hintertreffen zu geraten. Ausgenommen sind dabei all jene Unternehmen, die sich frühzeitig in internationalen Wachstumsmärkten etablieren konnten.

LAUFENDE P+D-PROJEKTE

Bei den laufenden Projekten konnten mit dem Bau der dachintegrierten **15 kWp Flachdachanlage CPT Solar mit amorphen Dünnschichtzellen in Trevano** [28a] (Titelbild) wertvolle Erfahrungen gesammelt werden. Der über den Erwartungen liegende Ertrag von 1070 kWh/kWp belegt die optimale Planung und Auslegung dieser Installation.

Mit dem Projekt **PV-DünnFilmTest** [32b] (Fig. 13) wird nach der zweijährigen Messphase die gute Eignung einiger Dünnschichtmodule für die Gebäudeintegration in Kombination mit einer thermischen Isolation aufgezeigt. Im Schlussbericht werden die detaillierten Auswertungen nachzulesen sein.

Interessant sind auch die Resultate der **62 kWp Flachdachanlage mit PowerGuard-Modulen** [27c] (Fig. 14). Neben der einfachen Montage überzeugt diese Anlage auch mit einem guten optischen Erscheinungsbild und einem hohen Ertrag.

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 Dünnschichtzellenmodule; Leitung: *Zagsolar / Wyss Aluhit*) [27a]



Figur 13: PV DünnFilmTest (Bildquelle NET)



Figur 14: 62 kWp Anlage mit PowerGuard Modulen (Bildquelle Zagsolar)

Anlagen

- 15.4 kWp Flachdachintegration *CPT Solar* (Pilotmässiger Einsatz einer neu entwickelten Kombination von amorphen Dünnschichtzellenmodulen mit einer dichten Kunststoffolie; Leitung: LEEE-TISO) [28a] (Titelbild)
- 23 kWp PV-Anlage Zollhof Kreuzlingen (Flachdach Demonstrationsanlage mit Grossanzeige an gut frequentierter Lage; Leitung: *Böhni Energie und Umwelt*) [29] (Fig. 15)
- Autonome 5.7 kWp Photovoltaik-Anlage in Kombination mit einem BHKW (Ganzjährige autonome Energieversorgung von 2 Jurahäusern mittels Photovoltaik, BHKW, thermischen Kollektoren und Holz; Leitung: A. Reinhard) [30]
- 17.6 kWp Flachdachanlage mit Dünnschichtzellenmodulen ETHZ (Optisch diskrete Flachdachanlage mit amorphen Zellen; Leitung: *BE Netz*) [31]
- 62 kWp Flachdachanlage mit *PowerGuard*-Solardachplatten (Multifunktionale PV-Flachdachanlage mit gleichzeitiger thermischer Isolation des Dachs, wobei die thermischen Dämmelemente auch die Funktion der Modulhaltekonstruktion übernehmen; Leitung: *Zagsolar*) [27c] (Fig. 14)
- 12 kWp *Solight*-Pilotanlage (Pilotmässige Umsetzung von zwei verschiedenen *Solight*-Varianten; Leitung: *Energiebüro*) [32a]
- 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*) [33]
- Photovoltaik Anlagen Corvigliabahn und Piz Nair St. Moritz (Realisierung einer 17.8 kWp Anlage entlang der Corvigliabahn und einer 9.7 kWp und 13.5 kWp Fassadenintegration in die Talstation, bzw. die Bergstation der Piz Nair Seilbahn; Leitung: *SunTechnics Fabrisolar*) [34]
- 27 kWp Anlage *AluStand* Hünenberg (Demonstrationsanlage mit Verwendung der Flachdachvariante des Modulhaltesystems *AluTec (AluStand)*; Leitung: Urs Bühler *Energy Systems and Engineering*) [35] (Fig. 16)
- 25 kWp Gründachintegration *Solgreen* Kraftwerk 1, Zürich (Piloteinsatz einer neu entwickelten Modul Haltekonstruktion für den Gründachbereich; Leitung: *Enecolo*) [36a] (Fig. 17)
- 3 kWp Anlage Ferme Amburnex (Inselanlage mit Hilfs-Dieselaggregat zur elektrischen Versorgung einer Alp, autonome Anlage; Leitung: *Services Industriels Lausanne*) [37]
- *RESURGENCE* - Renewable Energy Systems for Urban Regeneration in Cities of Europe (Realisierung von total 1.3 MWp PV-Anlagen im städtischen Raum in den 5 Ländern England, Holland, Dänemark, Deutschland und der Schweiz, EU-Projekt; Leitung Schweizer Teil: *Enecolo*) [36d]



Figur 15: PV Anlage Zollhof Kreuzlingen (Bildquelle NET)



Figur 16: 27 kWp Alustand Hünenberg (Bildquelle Urs Bühler Energy Systems)



Figur 17: Gründachanlage Solgreen Kraftwerk 1 Zürich (Bildquelle NET)



Figur 18: 80 kWp Fassade Bern Wittigkofen (Bildquelle NET)

Messkampagnen

- Messkampagne Wittigkofen (Detaillierte Messungen und Auswertungen mit Visualisierung der Daten zur 80 kWp Fassade Wittigkofen; Leitung: *Ingenieurbüro Hostettler*) [38a] (Fig. 18)
- Monitoraggio dell'impianto PV da 100 kWp AET III (Detaillierte Messkampagne zur revidierten 100 kWp PV-Anlage entlang der SBB Linie Bellinzona-Locarno; Leitung: LEEE-TISO) [28b]
- *PV-DünnFilmTest* Migros Zürich (18 Testanlagen mit PV-Dünnschichtzellen-Modulen im direkten Vergleich, Gesamtleistung: 24.5 kWp; Leitung: *Energiebüro*) [32b] (Fig. 13)
- Messkampagne 100 kWp Anlage A 13 (Leitung: *TNC Consulting*) [39]

Studien – Hilfsmittel – diverse Projekte

- Integration der neuen IEC Norm 60364-7-712 für Photovoltaik in die nationalen Installationsnormen NIN (Aktualisierung, bzw. Ersatz der veralteten PV-Normen; Leitung: *Electrosuisse*) [40]
- *GISS Gebäude-Integrierte-Solarstrom-Systeme* (Studie zur besseren Umsetzung von gebäudeintegrierten Solarstromsystemen durch Abbau von Hindernissen und Informationsmängeln und Erhöhung der Fachkompetenz bei Planern, Investoren und Bauherren; Leitung: *SZFF Schweizerische Zentralstelle für Fenster- & Fassadenbau*) [41]
- *Solar Electri City Guide* - Schweizer Solarstromführer für die Gemeinden (Leitung: *NET*) [42a]
- IEC Normenarbeit PV-Systeme (Leitung: *Alpha Real*) [43]
- Internetportal Photovoltaik Schweiz <http://www.photovoltai.ch> (Realisierung eines umfassenden Schweizer Internetauftritts mit umfangreichen Informationen zu nationalen und internationalen PV Aktivitäten; Leitung: *NET*) [42b]
- Photovoltaikstatistik der Schweiz 2004 (Leitung: Ing. Büro Hostettler, Energiebüro, VSE) [38b]
- Solarstrom vom EW (Leitung: *Linder Kommunikation*) [44]

IM JAHR 2004 ABGESCHLOSSENE PROJEKTE

Im Jahr 2004 wurden die folgenden P+D Projekte abgeschlossen (in chronologischer Reihenfolge):

Komponentenentwicklung

- Photovoltaik-Alpur-Dach (Photovoltaik Dach mit thermischer Isolation; Gebäudeintegration; Leitung: *ZAGSOLAR*) [27b]



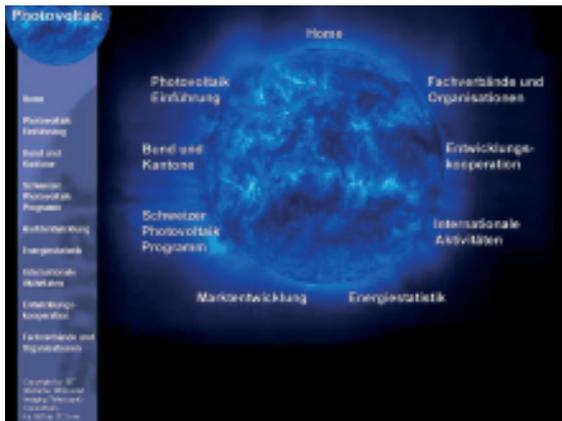
Edige Confederaziun Svizra Confederaziun Svizzera Confederaziun Svizzera Confederaziun Svizzera
 Inspezzion federala das installaziun e cuntroll Fort
 Inspezzion federala dagli impianti a corrent fort

STI Nr. 233.1104 el

Solar-Photovoltaik (PV)-Stromversorgungssysteme



Figur 19: Ausschnitt Titelblatt neue NIN Norm



Figur 20: Schweizer Photovoltaik Internetportal (<http://www.photovoltai.ch>)



Figur 21: 5.5 kWp Dachintegration Freestyle (Bildquelle Solstis)

Anlagen

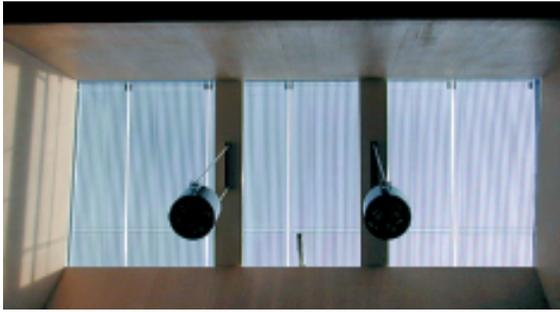
- 5.5 kWp Dachintegration mit dem Integrationssystem *Freestyle®* in Lutry (Vollflächige Photovoltaik-Dachintegration mit Modulen mit amorphen Tripelzellen, Pilotanlage; Leitung: *Solstis*) [45a] (Fig. 21)
- 15 kWp Photovoltaik-Dachintegration Pfadiheim Weiermatt Köniz (Vollflächige Photovoltaik Integration mit dem *MegaSlate®*-Solardachsystem ins Dach des energietechnisch optimierten Pfadiheims Weiermatt; Leitung: *Swiss Sustainable Systems*) [46] (Fig. 22)
- Photovoltaik Obelisk (Pilotmässige Realisierung von Informationssäulen mit modernem Design für den öffentlichen Raum mit integrierter PV-Anlage zur Energieversorgung; Leitung: *Enecolo*) [36c] (Fig. 23)
- 3.9 kWp Photovoltaik-Beschattungsanlage mit CIS-Modulen (Piloteinsatz von multifunktionalen teiltransparenten Modulen mit CIS-Zellen für die gleichzeitige Beschattung eines Atriums und die Stromproduktion; Leitung: *Enecolo*) [36b] (Fig. 24)
- 70 kWp Flachdachanlage Palexpo Genf (Netzgekoppelte Photovoltaik-Dachanlage an gut frequentierter Lage, kombiniert mit 2 Ladestationen für Elektromobile; Leitung: *SSES - Société Suisse pour l'Énergie Solaire*) [47] (Fig. 25)
- 16 kWp Dachintegration *Sunny Woods* (Dachintegrierte PV-Pilotanlage mit amorphen Tripelzellen in einem Mehrfamilien-Passivhaus; Leitung: *Architekturbüro Kämpfen, Naef Energietechnik*) [48]



Figur 22: 15 kWp Dachintegration Weiermatt (Bildquelle NET)



Figur 23: PV-Obelisk (Bildquelle NET)



Figur 24: PV-Beschattungsanlage Würth Chur
(Bildquelle NET)



Figur 26: Autonome 3 kWp Dachintegration
Soyhières (Bildquelle NET)



Figur 25: 70 kWp Flachdachanlage Palexpo
(Bildquelle NET)

Messkampagnen

- Messkampagne *Soyhières* (Detaillierte Messungen und Auswertungen zur autonomen 3 kWp PV-Dachintegration in Soyhières; Leitung: SGI / Solstis) [45b] (Fig. 26)
- 47 kWp Anlage *IBM* (Detaillierte Messkampagne zu schmutzabweisenden Oberflächenbeschichtungen von PV-Modulen; Leitung: awtec) [49]

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Der weltweite Photovoltaikmarkt boomt aufgrund grossangelegter Förderprogramme bzw. Einspeisevergütungen einzelner Länder weiterhin mit Wachstumsraten zwischen 30 und 40%. 2004 wurde in der Modulproduktion erstmals die 1000 MW Schwelle überschritten. Von diesem Wachstumsmarkt konnte die Schweizer Photovoltaik Industrie auch im Export profitieren; aufgrund von Umfragen wird das jährliche Photovoltaik-Exportvolumen auf mindestens 50 Mio. CHF geschätzt. Demgegenüber stagniert der schweizerische Photovoltaik-Markt bei ca. 2 MWp pro Jahr und konnte im Jahr 2004 den Vorjahreswert dank den Solarstrom- bzw. Ökostrombörsen leicht übertreffen. Die länderspezifischen Photovoltaik Marktdaten von IEA PVPS zeigen, dass die Schweiz relativ und gegenüber den Entwicklungen in den gegenwärtig grössten Märkten, insbesondere Deutschland, Japan und USA, weiter zurückfällt, und sich nun in absoluten Zahlen im Mittelfeld bewegt.

Die aufgrund des Entlastungsprogramms 2003 des Bundes beschlossenen Kürzungen sind inzwischen vorab für die Mittel für P+D-Vorhaben wirksam geworden und haben damit eine ein-

schneidende Wirkung auf die Ausgestaltung und die Möglichkeiten im Programm *Photovoltaik*. Im Berichtsjahr 2004 konnten mit BFE-Mitteln keine neuen P+D Projekte unterstützt werden. Diese Entwicklung ist sehr zu bedauern, da damit ein wesentliches Glied in der Umsetzung von Forschung und Entwicklung hin zu industriellen Produkten und Verfahren und damit zum Markt geschwächt wird. Dies trifft die Photovoltaik zu einem Zeitpunkt, in dem sich nach langem Aufbau eine verstärkte Umsetzung im Programm *Photovoltaik* abzeichnet. P+D-Projekte sind ein wesentliches Bindeglied zwischen Forschung / Entwicklung und der Umsetzung der Resultate in industrielle Prozesse, Produkte und Anlagen.

Durch die breite Abstützung des Programms *Photovoltaik* konnte der Rückgang der zur Verfügung stehenden Mittel im Bereich der Forschung bisher in Grenzen gehalten werden. Dazu haben EU-Projekte mit Unterstützung des SBF sowie seit 2004 auch durch die Europäische Kommission direkt beigetragen, ebenso die Kommission für Technologie und Innovation KTI. Die gute Vernetzung des Programms und seiner Akteure, sowohl national wie international, ist dabei eine wichtige Vor-

aussetzung, welcher weiterhin grosse Beachtung geschenkt wird. Es ist von zentraler Bedeutung, dass für die P+D-Vorhaben auch in Zukunft eine Substitution der ansonsten nicht vorhandenen Mittel gefunden werden kann.

An der ETHZ fand im März 2004 die gut besuchte 5. Nationale Photovoltaik Tagung statt. Die Schweizer Photovoltaik war auch an der 19. europäischen Photovoltaik Konferenz im Juni in Paris mit ihren Beiträgen gut vertreten [66]. Der Informationsaustausch bleibt in der Schweiz weiterhin ein wichtiges Thema. Die Photovoltaik Webseite <http://www.photovoltaic.ch> beinhaltet alle wesentlichen Informationen sowie Berichte und dient damit als wichtiges Informationsinstrument, das laufend unterhalten wird. Dies ist ab

2005 besonders wichtig, da der frühere ENET-Publikationsdienst in seiner bisherigen Form nicht fortgeführt werden kann und in Zukunft nur noch mit reduziertem Umfang (<http://www.energieforschung.ch>) betrieben wird.

Am 12. April 2005 findet an der EMPA ein Fachseminar im Bereich der Solarzellenforschung statt. Als wichtigste nationale Veranstaltung ist im Jahr 2005 die 6. Nationale Photovoltaik Tagung in Genf zu nennen (24./25. November 2005) sowie die 20. Europäische Photovoltaik Konferenz in Barcelona (6.-10. Juni 2005, <http://www.photovoltaic-conference.com>), die Fachmesse Intersolar in Freiburg (23.-25. Juni 2005, <http://www.intersolar.de>) und das 20. Symposium für Photovoltaische Solarenergie in Staffelstein (9.-11. März 2005).

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

Einzelne Jahresberichte und Schlussberichte können von <http://www.photovoltaic.ch> heruntergeladen werden. Unter den aufgeführten Internet-Adressen sind weitergehende Informationen vorhanden.

- [1] A. Shah (arvind.shah@unine.ch), IMT, UNI-Neuchâtel: **a) Thin film silicon modules: Contributions to low cost industrial production** (JB, SB) ♦ **b) High rate deposition of μ -Si:Hsilicon thin-film solar cell devices in industrial KAI PE-CVD reactor** (JB) ♦ **c) Optical nano-gratings and continuous processing for improved performance flexible solar cells** (JB) / <http://www.micromorph.unine.ch>.
- [2] Ch. Hollenstein (christophe.hollenstein@epfl.ch), CRPP / EPF, 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] D. Fischer (diego.fischer@flexcell.ch), VHF-TECHNOLOGIES, Le Locle: **a) Étude et amélioration de la fiabilité des cellules solaires sur substrats polymers** (SB) ♦ **b) Ligne pilote de fabrication de cellules solaires** (JB, SB) / <http://www.flexcell.ch>.
- [5] H. Keppner (herbert.keppner@he-arc.ch), Haute école Arc, Le Locle: **Nano-Patterning** (JB) / <http://www.eiaj.ch>.
- [6] S. Schneeberger (amueller@hct.ch), HCT Shaping Systems, Cheseaux: **RE-Si-CLE: Recycling of Silicon Rejects from PV Production Cycle** / <http://www2.hct.ch>.
- [7] W. Durisch (wilhelm.durisch@psi.ch), PSI, Villigen: **a) Heizkessel für elektrisch-autarken Betrieb mittels thermophotovoltaischem Generator (HEAT)** ♦ **b) A new PV wave making more efficient use of the solar spectrum – FULLSPECTRUM** / <http://www.psi.ch>.
- [8] A.N. Tiwari (tiwari@phys.ethz.ch), ETH, Zürich: **a) FLEXCIM: Flexible CIGS solar cells and mini-modules** (JB) ♦ **b) METAFLEX: Towards the roll-to-roll manufacturing of cost effective CIS modules-intermediate Stepps** (JB) ♦ **c) NEBULES: New buffer layers for efficient chalcopyrite solar cells** (JB) / <http://www.tfp.ethz.ch/>.
- [9] M. Grätzel (michael.graetzel@epfl.ch), EPF, Lausanne: **a) Dye - sensitised Nanocrystalline Solar Cells** (JB) ♦ **b) NANO-MAX - dye-sensitised nanocrystalline solar cells having maximum performance** (JB) ♦ **c) Voltage Enhancement of Dye Solar Cells at Elevated Operating Temperatures** (JB) ♦ **d) Nanocrystalline flexible photovoltaic cells based on sensitised heterojunctions** (JB) ♦ **e) MOLYCELL - Molecular Orientation, Low band-gap and new hybrid device concepts for flexible organic solar CELLS** (JB) / <http://lpi.epfl.ch>.
- [10] J. A. Manson (jan-anders.manson@epfl.ch), EPF, Lausanne: **Photovoltaic Fibers and Textiles based on Nanotechnology** / http://dmxwww.epfl.ch/lc/lc_main.htm.
- [11] G. Calzaferri (gion.calzaferri@iac.unibe.ch), UNI, Bern: **Photochemische, Photoelektrochemische und Photovoltaische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie** (JB) / <http://www.dcb.unibe.ch/groups/calzaferri/>.
- [12] P. Hofer (ho@3-s.ch), 3S, Bern: **a) Photovoltaics Modules with Antireflex Glass** (JB) ♦ **b) AFRODITE Advanced facade and roof elements key to large scale building integration of photovoltaic energy** (JB) ♦ **c) BIPV-CIS - Improved integration of PV into existing buildings by using thin firm modules for retrofit** (JB) / <http://www.3-s.ch/>.

- [13] W. Lohwasser (wolfgang.lohwasser@alcan.com), Alcan Packaging Services, Neuhausen: **HIPROLOCO High productivity and low cost for the encapsulations of thin film solar** / http://www.alcanpackaging.com/about/eng/about_rd.php.
- [14] R. Züst (reinhard.zuest@telsonic.com), Telsonic, Bronschhofen: **CONSOL - Connection Technologies for Thin-Film Solar Cells** (JB) / <http://www.telsonic.com>.
- [15] Ch. Roecker (christian.roecker@epfl.ch), LESO / EPF, Lausanne: **a) Exploitation Demosite 2003-2004** (JB) / <http://www.demosite.ch> • **b) N. Morel, (nicolas.morel@epfl.ch) SUNtool A Sustainable Urban Neighborhood Modelling Tool** (JB) / <http://lesomail.epfl.ch>.
- [16] A. Bernasconi (angelo.bernasconi@supsi.ch), LEEE, SUPSI, Canobbio: **a) Centrale LEEE-TISO Periodo VII: 2003-2004** (JB) • **b) PV Enlargement** (JB) • **c) PV Catapult (JB)** / <http://www.lee.ee.supsi.ch>.
- [17] H. Häberlin (heinrich.haerberlin@hti.bfh.ch), HTI, Burgdorf: **Photovoltaik-Systemtechnik 2003-2004 (PVSYTE)** (JB) / <http://www.pvtest.ch>.
- [18] R. Kröni (robert.kroeni@enecolo.ch), ENECOLO, Mönchaltorf: • **a) Energy Rating of Solar Modules** (JB, SB) / <http://www.solarstrom.ch> • **b) P. Toggweiler, (info@enecolo.ch) PVSAT2 - Intelligent Performance Check of PV System Operation Based on Satellite Data** (JB) • **c) ENVISOLAR** / <http://www.solarstrom.ch>.
- [19] A. Meyer (andreas@solaronix.com), Solaronix, Aubonne: **The European Polymer Solar Battery EURO-PSB** (JB) / <http://www.solaronix.com>.
- [20] P. Ineichen (pierre.ineichen@cuepe.unige.ch), CUEPE, Genève: **Energy specific Solar Radiation Data from Meteosat Second Generation: The Heliosat-3 project** (JB) / <http://www.unige.ch/cuepe>.
- [21] P. Affolter (pascal.affolter@solstis.ch), SOLSTIS, Lausanne: **PV Catapult** (JB) / <http://www.solstis.ch>.
- [22] A. Borschberg (andre.borschberg@solarimpulse.com): **Solarimpulse** / SOLAR IMPULSE, Lausanne: <http://www.solar-impulse.com>.
- [23] P. Hüsler (pilus.huesser@novaenergie.ch), Nova Energie, Aarau: **Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Programm, Task 1** (JB) / <http://www.novaenergie.ch/>.
- [24] Th. Nordmann (nordmann@tnc.ch), TNC Consulting, Erlenbach: **IEA PVPS Programm, Task 2 (Schweizer Beitrag 2004)** (JB) / <http://www.tnc.ch>.
- [25] M. Villoz (mvilloz@dynatex.ch), DYNATEX, Morges: **a) IEA PVPS Task 3 Use of photovoltaic systems in stand-alone and island applications** (JB, SB) / <http://www.dynatex.ch>.
- [26] S. Nowak (stefan.nowak@netenergy.ch), NET, St. Ursen: **a) Swiss Interdepartmental Platform for Renewable Energy Promotion in International Co-operation (REPIC) including Swiss contribution to IEA PVPS Task 9** (JB) • **b) PV-EC-NET: Network for Co-ordination of European and National RTD Programmes on Photovoltaic Solar Energy** • **c) PV-NAS-NET: Co-ordination of Newly Associated States and EU RTD Programmes on Photovoltaic Solar Energy** (JB) • **d) PV-ERA-NET: Networking and Integration of National and Regional PV Programmes** (JB) / <http://www.photovoltai.ch>, <http://www.netenergy.ch>.

Liste der P+D – Projekte

- [27] R. Durot (r.durot@zagsolar.ch), ZAGSOLAR, Kriens: **a) Photovoltaic- Facade Mounting System for Thin-Film-Modules** (JB) • **b) Photovoltaic-Alpur-Roof - New Roofing System for Photovoltaic Modules** (JB, SB) • **c) 62 kWp PV-Installation - Flat Roof Integration with PowerGuard Tiles** (JB) / <http://www.zagsolar.ch/>.
- [28] D. Chianese (domenico.chianese@supsi.ch), LEEE-TISO, Canobbio: **a) Flat roof integration CPT Solar** (JB). • **b) S. Rezzonico (sandro.rezzonico@supsi.ch) Monitoraggio dell'impianto PV da 100 kWp AET III a Riazzino** (JB) / <http://www.lee.ee.supsi.ch>.
- [29] Th. Böhni (boehni@euu.ch), BÖHNI ENERGIE UND UMWELT, Frauenfeld: **23.5 kWp PV Anlage Zollhof Kreuzlingen** (JB) / <http://www.euu.ch>.
- [30] A. Reinhard (a.reinhard@prospective-concepts.ch), **Autonome Stromversorgung mit Photovoltaik und BHKW.**
- [31] B. Börlin (boerlin@benetz.ch), BE NETZ AG, Luzern: **17.6 kWp Installation with Thin-Film-Elements on the Flat Roof at the CNB-Building of the ETHZ** (JB) / <http://www.benetz.ch>.
- [32] Ch. Meier, R. Frei (info@energieburo.ch), ENERGIEBÜRO, Zürich: **a) Preparation and Realisation of the Test- and Pilot Installation SOLIGHT** (JB) • **b) PV-ThinFilmTest** (JB) / <http://www.energieburo.ch>.
- [33] U. Muntwyler (muntwyler@solarcenter.ch), MUNTWYLER ENERGIETECHNIK, Zollikofen: **Autonome Stromversorgung mit Photovoltaik und Brennstoffzellen** (JB).
- [34] S. Leu (info@suntechnics.ch), SUNTECHNICS FABRISOLAR, Küsnacht: **PV St. Moritz - Corvigliabahn - Piz Nair** / http://www.suntechnics.ch/de/unternehmen_1ak.htm.
- [35] U. Bühler (u.bue@bluewin.ch), URS BÜHLER ENERGY SYSTEMS AND ENGINEERING, Cham: **27 kWp Anlage Hünenberg Montagesystem Alustand Freizeit- und Sportgebäude Ehret** (JB) / <http://www.alustand.ch>.
- [36] J. Rasmussen (info@enecolo.ch), ENECOLO, Mönchaltorf: **a) Solgreen Kraftwerk 1 Zürich** (JB) • **b) D. Ruoss (info@enecolo.ch) Monitoring of the CIS BIPV Plant Würth in Choire** (JB, SB) • **c) PV Obelisk – Information system in the public sector** (SB) / <http://www.solarstrom.ch> • **d) R. Kröni (robert.kroeni@enecolo.ch) RESURGENCE – Renewable Energy Systems for Urban Regeneration in Cities of Europe** (JB).

- [37] P. Favre (pierre-pascal.favre@lausanne.ch), SERVICES INDUSTRIELS, Lausanne: **Amburnex Solar Farm (3 kWp)** / <http://www.lausanne.ch/energie>.
- [38] Th. Hostettler (hostettler_engineering@compuserve.com), INGENIEURBÜRO HOSTETTLER, Bern: **a) Messkampagne Wittigkofen (JB) ♦ b) Photovoltaic Energy Statistics of Switzerland 2004**(JB)
- [39] Th. Nordmann (mail@tnc.ch), TNC CONSULTING, Erlenbach: **100 kWp PV-Netzverbundanlage A13 Messkampagne, Periode 2004** (JB) / <http://www.tnc.ch>.
- [40] J. Keller (jost.keller@electrosuisse.ch), ELECTROSUISSE, Fehraltorf: **Integration der neuen IEC Norm 60364-7-712 für Photovoltaik in die nationalen Installationsnormen NIN** (JB, SB) / <http://www.electrosuisse.ch>.
- [41] R. Locher (rlocher@szff.ch), SCHWEIZERISCHE ZENTRALSTELLE FÜR FENSTER - + FASSADENBAU (SZFF), Dietikon: **Gebäude-Integrierte-Solarstrom-Systeme GISS** (JB) / <http://www.szff.ch>.
- [42] S. Nowak (stefan.nowak@netenergy.ch), NET, St. Ursen: **a) Solar Electri City Guide -Schweizer Solarstromführer für die Gemeinden (JB) ♦ b) Swiss Photovoltaic Internet Portal** – <http://www.photovoltai.ch> (JB) / <http://www.netenergy.ch>.
- [43] M. Real (alphareal@access.ch), ALPHA REAL, Zürich: **IEC Normenarbeit für PV Systeme** (JB) / <http://www.iec.ch>.
- [44] E. Linder (zuerich@linder-kom.ch), LINDER KOMMUNIKATION, Zürich: **Solarstrom vom EW** (JB) / <http://www.linder-kom.ch> / <http://www.strom.ch/deutsch/ch-strom/solarstrom-ew.asp>.
- [45] P. Affolter (pascal.affolter@solstis.ch), SOLSTIS, Lausanne: **a) Toiture photovoltaïque Freestyle® de 5.5 kWp (JB, SB) ♦ b) Campagne de mesures de l'installation de 3 kWp à Soyhières (JU)** (JB, SB) / <http://www.solstis.ch>.
- [46] T. Szacsavay (sz@3-s.ch), SWISS SUSTAINABLE SYSTEMS 3S, Bern: **Roof Integrated PV-System Scout House Weiermatt, Köniz** (SB) / <http://www.3-s.ch/>.
- [47] L. Keller (office@sses.ch), SOCIÉTÉ SUISSE POUR L'ENERGIE SOLAIRE SSES, Bern: **Installation photovoltaïque à Palexpo** (SB) / <http://www.sses.ch/>.
- [48] R. Naef (naef@igjzh.com), NAEF ENERGIETECHNIK / B. Kämpfen (info@kaempfen.com), BÜRO FÜR ARCHITEKTUR KÄMPFEN, Zürich: **Sunny Woods - Photovoltaik-Anlage in Blechdach integriert** / <http://www.kaempfen.com/>.
- [49] A. Schlegel (andreas.schlegel@awtec.ch), AWTEC, Zürich: **Beschichtung von PV-Modulen** (SB) / <http://www.awtec.ch>.

Referenzen

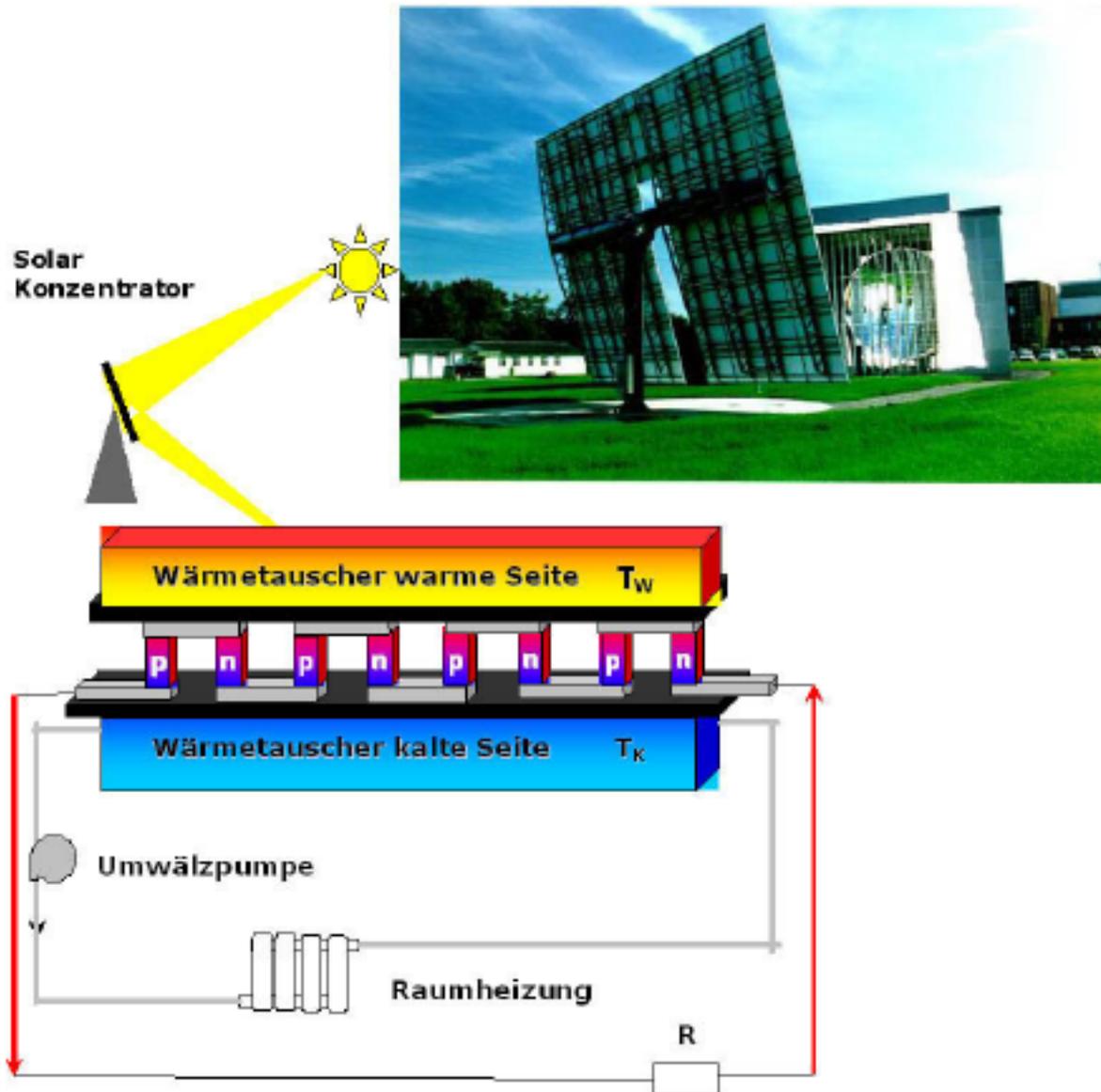
- [50] **Forschungskonzept Photovoltaik 2004 – 2007**, Bundesamt für Energie, 2005, <http://www.photovoltai.ch>.
- [51] <http://www.photovoltech.be>.
- [52] **Annual Report 2004**, IEA PVPS, 2004, <http://www.iea-pvps.org/>.
- [53] **National Survey Report on PV Power Applications in Switzerland 2003**, P. Hüsser (pilus.huesser@novaenergie.ch), Nova Energie, May 2004.
- [54] **Trends in Photovoltaic Applications in selected IEA countries between 1992 and 2003**, IEA PVPS Task 1 – 13: 2004, <http://www.iea-pvps.org>.
- [55] **Solarenergie – ungetrübter Sonnenschein?**, M. Fawer-Wasser (matthias.fawer@sarasin.ch), Sarasin, November 2004.
- [56] **Sun screen - Investment opportunities in solar power**, M. Rogol (michael.rogol@clsa.com), CLSA, July 2004.
- [57] **IEA PVPS Newsletter**, zu beziehen bei Nova Energie, Schachenallee 29, 5000 Aarau, Fax 062 834 03 23, (pilus.huesser@novaenergie.ch).
- [58] **Performance Database**, IEA PVPS Task 2, Version 1:19, June 2004, <http://www.task2.org>.
- [59] **Country reports on PV system performance**, December 2004, IEA-PVPS T2-05:2004, <http://www.task2.org>.
- [60] **The Availability of Irradiation Data**, April 2004, IEA-PVPS T2-04:2004, <http://www.task2.org>.
- [61] **Survey of national and international standards, guidelines & QA procedures for stand-alone PV systems**, 2nd edition, IEA PVPS T3-07:2004, May 2004, <http://www.iea-pvps.org>.
- [62] **Managing the Quality of Stand-Alone Photovoltaic Systems**, Recommended Practices, IEA PVPS T3-15:2003, January 2004, <http://www.iea-pvps.org>.
- [63] **Managing the Quality of Stand-Alone Photovoltaic Systems**, Case studies, IEA PVPS T3-15(2):2003, April 2004, <http://www.iea-pvps.org>.
- [64] **Sources of financing for PV-based rural electrification in developing countries**, IEA PVPS T9-08:2004, May 2004, <http://www.iea-pvps.org>.
- [65] **A Vision for Photovoltaic Technology for 2030 and Beyond**, Photovoltaic Technology Research Advisory Council (PV-TRAC), September 2004.
- [66] **Die 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition Paris 07. - 11. 06. 2004 aus Schweizer Sicht**, zu beziehen bei NET, Waldweg 8, 1717 St. Ursen, info@netenergy.ch, <http://www.photovoltai.ch>.

SOLARCHEMIE / WASSERSTOFF

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Armin Reller

armin.reller@physik.uni-augsburg.de



Thermoelektrizität – eine verkannte Technologie zur Umwandlung von Solarstrahlung in Elektrizität?

Schematische Abbildung einer Anlage, die konzentrierte Solarstrahlung mittels luft- und temperaturbeständiger thermoelektrischer Funktionsmaterialien in Elektrizität umwandelt. Diese umweltfreundliche und in unterschiedlichsten Umgebungen nutzbare Technologie erfordert die Entwicklung und Optimierung von massgeschneiderten Materialeigenschaften und Materialkombinationen.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im Programm **Solarchemie / Wasserstoff** werden Technologien zur Umwandlung, Speicherung und Nutzung von solarer Strahlungsenergie oder sekundärer regenerativer Energiequellen mittels thermischer und/oder chemischer Prozesse entwickelt. Ziel ist die dezentrale Bereitstellung und Speicherung von elektrischer Energie, Wärmeenergie, Wasserstoff oder von weiteren solarchemisch erzeugten Energieträgern und Wertstoffen. Es werden möglichst effiziente Prozesse angestrebt, bei denen ein wesentlicher Anteil der erforderlichen Energie durch direkte Solarstrahlung und/oder in Kombination mit gespeicherter Solarenergie – z. B. in Form von Biomasse oder Biogas – abgedeckt wird. Eine wichtige Zielsetzung des Programms besteht in der Reduktion der Nutzung fossiler Energieträger und damit des CO₂-Ausstosses. Der Integration von solaren Produkten und Prozessen in bestehende Energie- und Materialsysteme wird grosse Bedeutung beigemessen. Als wichtigstes solares Produkt wird Wasserstoff betrachtet. Für diesen sekundären Energieträger werden Herstellungs-, Speicherungs- und Nutzungstechnologien bzw. -prozesse erforscht und geprüft. Alle Projekte basieren auf in der Schweiz vorhandenen ideellen und materiellen Ressourcen. Die Schwerpunkte des Programms liegen also klar in der Entwicklung und/oder Optimierung von Verfahren und Produkten mit hoher Wertschöpfung, von innovativen Funktionsmaterialien und effizienten Energietechnologien.

Grundlage für die im Programm durchgeführten Projekte ist die Verfügbarkeit regenerativer Energiequellen oder -potentiale, d.h. direkte Solarstrahlung sowie die indirekten bzw. gespeicherten Solarenergieformen Wasserkraft und Biomasse. Mit diesen Energieressourcen wird versucht, mittels effizienter Transformationen Energieträger zu generieren, die ihrerseits speicherbar und in vielfältiger, nachhaltiger Weise nutzbar sein sollen. Ein Schwerpunkt bildet seit langem die Nutzung **solarer Prozessenergie** zur Herstellung von Zink oder Wasserstoff als sekundäre Energieträger, neuerdings auch zur Gewinnung strategisch wichtiger Metalle aus ihren Erzen. Ziel dieser Anstrengungen ist die Substitution konventioneller Produktionsweisen, die in der Regel mit fossilen Energieträgern betrieben werden; solare Hochtemperaturprozesse sollen also für die Reduktion von Kohlendioxidemissionen sowie für die immer bedeutender werdende Kreislaufwirtschaft von Materialien einen entscheidenden Beitrag leisten.

Die effiziente Bereitstellung des sekundären Energieträgers Wasserstoff ist das primäre Ziel des Bereichs **Wasserstofftechnologie**. Als Prozesse der Wahl werden die solarthermische (Zink/Zinkoxidzyklus), die elektrolytische und photokatalytische Spaltung von Wasser bearbeitet. Aber auch die Gewinnung von Wasserstoff aus der katalysierten Konversion von Biomasse oder aus der Dekarbonisierung fossiler Energieträger werden eingehend untersucht. Die sichere Speicherung von Wasserstoff – einerseits chemisch in Form von Metallhydriden, andererseits physikalisch in Druckbehältern – ist eine immer noch unterschätzte Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Implementierung der Wasserstofftechnologie. Sie erfordert insbesondere geeignete Funktionsmaterialien sowie effiziente Prozesse und technische Systeme. Die Koordination der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sowie die Förderung der Zusammenarbeit zwischen Forschung, Industrie und Wirtschaft werden durch die schweizerische Wasserstoff-Vereinigung **Hydropole** unterstützt.

Im Bereich Innovationen werden die regenerativen Energietechnologien mitbestimmende Faktoren wie die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit **massgeschneiderter Funktionsmaterialien** und **effizienter Verfahren** untersucht. Diese Aktivitäten haben den Charakter, neue Entwicklungsfelder ausfindig zu machen und bis zum Prototypstatus auszuarbeiten. Als Beispiel seien schichtartig aufgebaute Materialien für Fenster mit selektiven Absorptionseigenschaften genannt, die ein sehr effizientes Energiemanagement im Tief- und Mitteltemperaturbereich für die Haus- und Gebäudetechnik – ein Einsatzgebiet mit hohem CO₂-Einsparpotential – ermöglichen. Des Weiteren wird die Energiespeicherung mittels Drucklufttechnologie bearbeitet; theoretische Studien und praktische Weiterentwicklungen belegen, dass das Potential dieser Energietechnologie bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist. Der Einsatz thermoelektrischer Materialien zur Gewinnung von elektrischer Energie aus unterschiedlichen Wärmequellen wurde im Berichtsjahr als neuestes Forschungsprojekt initiiert. Schliesslich werden auch die Arbeiten zur Herstellung von Grundchemikalien mit hoher Wertschöpfung aus Kohlendioxid weiter vorangetrieben. Dabei erweisen sich die Synthesen in überkritischem Kohlendioxid als Lösungsmittel als sehr viel versprechend.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

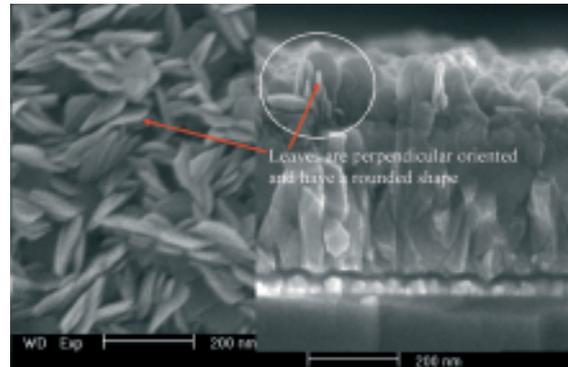
Photokatalytische Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff

Für die effiziente Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mittels Solarstrahlung bei Umgebungstemperatur wurden effiziente Photokatalysatoren, selektive Photosensibilisatoren und angepasste Elektrodenmaterialien im Forschungsverbund zwischen der Universität Bern, der EPF Lausanne und der Université de Genève weiter entwickelt und geprüft. In den Projekten **Photochemische, photoelektrochemische und photovoltaische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie** [1], **Generation of Hydrogen by Water Splitting with Visible Light** [2] und **La photolyse de l'eau et la production d'hydrogène et d'oxygène au moyen de l'énergie solaire** [3] konnten Materialkombinationen entwickelt und zu funktionstüchtigen Systemen vereinigt werden.

An der Universität Bern wurde gezeigt, dass die photokatalytische Wasserspaltung mit Ag/AgCl als Photoanode und einer Halbleiter-Photokathode funktionstüchtig gemacht werden kann. Auch die Entwicklung einer Dünnschicht-Antennen-Solarzelle basierend auf Farbstoff-Zeolith-L-Antennen – eingebettet in einem Plastik-Substrat oder auf einem sehr dünnen Silizium-Substrat aufgebracht – entwickeln sich zu brauchbaren Vorrichtungen für die Speicherung von Sonnenenergie in Form von Wasserstoff. Diese Materialkombination kann gleichermaßen als erste Vertreterin einer neuen Generation von photovoltaischen (Festkörper-)Solarzellen bezeichnet werden.

Die Materialstudien an der EPF Lausanne führten zu drei für die Verbesserung der Tandem-Zelle bemerkenswerten Resultaten: mit Hilfe des sogenannten Spraypyrolyse-Verfahrens gelang es, eine neuartige Anode zu realisieren, die aus spezifisch orientierten Eisenoxid-Nanokristallen auf elektrisch leitendem (fluorierten) Zinnoxid aufgebaut ist (Fig. 1). Diese Kombination verspricht ein besseres Leistungsverhalten als die bisher eingesetzte Wolframtrioxid-Anode. Des Weiteren gelang es, mit sich selbst anordnenden Photosensibilisator-Molekülen hocheffiziente Absorptionsschichten für das einfallende Spektrum der Solarstrahlung herzustellen. Damit sind Wirkungsgrade von über 11% erreichbar, was bis anhin nie gelang. Zusätzlich zu den bekannten Ruthenium-basierten Photosensibilisatoren konnte ein neues, im grünen Bereich absorbierendes Zink-basiertes System synthetisiert und charakterisiert werden: Absorp-

tionswirkungsgrade von über 6.5% zeugen von den bemerkenswerten Eigenschaften dieses Materials.



Figur 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Eisenoxid-Nanokristallen (links), die auf einer fluorierten Zinnoxidschicht (FTO) aufgebracht als Kompositmaterial bzw. als effiziente Photoanode in der Tandemzelle zur photokatalytischen Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff eingesetzt wird.

Die genannten Arbeiten wurden durch die an der Universität Genf durchgeführten Studien zur reproduzierbaren Herstellung von reinen sowie mit Indium, Lithium oder Chrom dotierten, transparenten Eisenoxid-Anodenschichten komplettiert. Auch die immer noch erheblichen Probleme der Verfügbarkeit guter Elektrolytsysteme konnten reduziert werden, indem sich durch zusätzliche und synergetisch arbeitende Redox-Systeme die bestehenden Elektrolytsysteme deutlich verbessern ließen. Die im genannten Forschungsverbund erzielten Resultate sind insgesamt wichtige Schritte für die Realisierung einer neuen Generation von photovoltaisch arbeitenden Systemen zur Stromerzeugung, zur Herstellung von solarem Wasserstoff, aber auch als erwünschter Spin-off - zur Detoxifizierung von Wasser, einem enorm wichtigen Prozess für die Bereitstellung von Trinkwasser. Insgesamt belegen die erzielten Resultate, dass Materialkompetenz wohl einer der grundlegenden Faktoren für die Entwicklung effizienter regenerativer Energiesysteme darstellt. Dieser Sachverhalt kommt dem Technologiestandort Schweiz entgegen, müsste aber auch durch stetige Förderung konkurrenzfähig erhalten werden.

Solarthermische Spaltung von Wasser

Prozesse zur Gewinnung von Zink als Metall der Wahl für die Spaltung von Wasser in Wasserstoff

und Sauerstoff mittels mehrstufiger, reversibler Metall/Metalloxid-Redoxzyklen gehört zu der über viele Jahre aufgebauten Kernkompetenz des Programms. Im Projekt **Solarchemische Beiträge zur Reduktion des CO₂-Ausstosses** [4] wurden die Bedingungen erarbeitet, welche eine effiziente Abtrennung des Zinkdampfs von den restlichen Gasen am Ausgang der verwendeten Solarreaktoren erlauben. Die Frage nach der Bildung von Zinkverbindungen in der Gasphase, die während des Abkühlens des Zinkdampfes als Kondensationskeime wirken können, wurde im Projekt **Darstellung und Spektroskopie von ZnO bzw. Zn_xO_y in der Gasphase** [5] bearbeitet. Die massenspektrometrischen und laserspektroskopischen Messungen ermöglichten wichtige Rückschlüsse auf die von den jeweiligen Bedingungen abhängige Bildung von neutralen ZnO bzw. ZnOH und weiteren Zn-Spezies. Mit dem nun etablierten solarthermischen Zink/Zinkoxidzyklus lassen sich interessante regenerative Energietechnologien betreiben: mit dem gebildeten Zink kann Wasser zu Zinkoxid und Wasserstoff umgesetzt werden, oder Methan kann mit Zinkoxid zu Zinkmetall und Synthesegas, also zu zwei attraktiven Produkten, reagieren. In einem weiterführenden Ansatz wurden Bestrebungen der Industrie aufgenommen, die Gewinnung von Metallen mit strategischer technischer Bedeutung nachhaltiger zu gestalten. Durch die Nutzung von konzentrierter Solarstrahlung und weiterer verfahrenstechnischer Änderungen soll erreicht werden, dass der Ausstoß von Schwefeloxiden sowie von Kohlendioxid massiv reduziert werden können. Experimente mit Kupfererzen – ein Metall mit enorm hoher Nachfrage – zeigten viel versprechende Resultate.

Derartige Prozesse können in Zukunft konventionelle, mit hohen Kohlendioxid-Emissionen verbundene Erz-Verhüttungen ersetzen und so einen wichtigen Beitrag zu einer schon lange geforderten Kreislaufwirtschaft leisten. Die beschriebenen Aktivitäten belegen, dass auf dem Weg zu einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft viele interessante Nebenprodukte bzw. Nebenprozesse aufgefunden werden, die ihrerseits für spezifische Anwendungen relevant werden können.

Solarthermische Herstellung von Wasserstoff oder Synthesegas aus fossilen Rohstoffen

Die Vergasung von Biomasse liefert ein Produkt- oder Synthesegas, welches entweder direkt für die Stromerzeugung genutzt oder in chemischen Prozessen zu Treibstoffen umgesetzt werden kann. Vor diesem Hintergrund wird im Projekt **Sauerstoff-Transfer-Materialien für die Biomassevergasung** [6] mit dem Wirbelschicht-

vergasungsverfahren versucht, ein stickstofffreies, wasserstoffreiches Produktgas herzustellen. In Abhängigkeit von der Vergasungstemperatur entsteht bei der Vergasung primäres Methan, d.h. die Biomasse-moleküle werden teilweise zu Methan abgebaut. Als Nebenprodukte entstehen dabei auch mehr oder weniger Teere, analog zum Mechanismus der primären Methanbildung. Je nach physikalischer und chemischer Beschaffenheit der Teerspezies führen diese in nachgeschalteten Prozessen zu Störungen. Sollen aus dem Produktgas Treibstoffe wie Wasserstoff, Methanol oder Fischer-Tropsch-Diesel hergestellt werden, sind Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂) die gewünschten Ausgangsstoffe. Für einen hohen chemischen Umwandlungswirkungsgrad, ist deshalb ein möglichst hoher Umsatz des Methans zu CO und H₂ erwünscht. Im Rahmen dieses Projekts wird in einem neuartigen Ansatz Dampf als Vergasungsmittel in der Wirbelschichtvergasung eingesetzt, wobei jedoch gleichzeitig durch ein reaktives Bettmaterial die Teerbildung deutlich vermindert werden soll. Entscheidend ist dabei, chemisch aktive Bettmaterialien zu finden, welche die erwünschten thermochemischen Eigenschaften sowie die nötige Wirbelschichtfestigkeit aufweisen. Von Interesse sind Eisen-Magnesium-Silikate (Fe,Mg)₂SiO₄ (Olivine), die in der Praxis bereits erfolgreich erprobt wurden, und perovskitartige Mischoxide der Formel ABO_{3-δ}. Gelingt es, diesen Ansatz erfolgreich umzusetzen, ist mit einer Steigerung des Wirkungsgrads, einer Systemvereinfachung und einer Kostenreduktion zu rechnen. Ende 2003 gab es erstmals experimentelle Hinweise, dass binäres Eisenoxid, welches durch die Reaktion von Olivin mit Luft im Flugstromreaktor entsteht, die aktive Substanz für den Teerabbau ist. Dieser Befund wurde 2004 durch Modellrechnungen und experimentelle Resultate bestätigt. Weil Eisenoxid auch die primär gebildeten Brennstoffe CO und H₂ oxidiert, wurden mit Untersuchungen an perovskitartigem, dotierten Lanthanchromat, La_{0,65}Sr_{0,35}CrO_{3-δ}, geprüft, ob solche schwer reduzierbare Metalloxide mit Kohlenwasserstoffen selektiv zu CO und H₂ reagieren.

Speicherung von Wasserstoff

Die effiziente Speicherung von Wasserstoff gilt weiterhin als zentrale Herausforderung für einen zukünftigen Einsatz dieses sekundären Energieträgers, insbesondere für Anwendungen in Verkehrssystemen. Unter den drei gegenwärtig untersuchten Speichermethoden – Flüssiggasspeicher bei extrem tiefen Temperaturen, Metallhydridspeicher und Druckgasspeicher – wurden im Programm nur die letzteren beiden Optionen behandelt. An den Universitäten Fribourg und

Genf wurden in den Projekten **Wasserstoffspeicherung in Metall- und komplexen Hydriden** [7] sowie **Destabilisation of Metal Hydride Complexes and Theoretical Modelling** [8] weiterhin materialwissenschaftliche Studien an Metallverbindungen mit hoher Wasserstoff-Speicherkapazität durchgeführt. Hauptaugenmerk galt den Hydriden leichter Metalle wie Bor und Aluminium, aber auch komplexer Übergangsmetallhydride wie Eisen- und Nickelhydride. Als wichtiger Befund konnte gezeigt werden, dass zur Verbesserung des Temperaturmanagements bzw. des Hydrier- und Dehydrierprozesses katalytisch aktive Zusätze eingesetzt werden können. Sie lassen sich mittels Dotierung oder aber – was für eine technische Realisierung sehr nutzbringend ist – durch Mahlen in der Kugelmühle einbringen. Im letzteren Fall bleibt die Wirksamkeit bemerkenswerterweise intakt. Im Rahmen des Projekts **Demonstration eines Metallhydrid Speichers in einem mit Wasserstoff angetriebenen Pistenfahrzeug** [9] wurde in einem Praxistest ein Pistenfahrzeug mit industriellen Metallhydriden ausgerüstet und mit einem Verbrennungsmotor als Energietransformator bzw. Antriebsaggregat auf seine Funktionstüchtigkeit überprüft (Fig. 2).



Figur 2: Mit Wasserstoff angetriebenes Pistenfahrzeug.

Im Projekt **Hydrobar – Diffusionssperrschichten für Wasserstoff** [10] wurden die Untersuchungen zur Option der physikalischen Speicherung in Hochdrucktanks von Wasserstoff abgeschlossen. Es konnte gezeigt werden, dass insbesondere bei erhöhten Temperaturen die Dichtheit der aus Polyethylen-Liner und Kohlefaser-Mantel aufgebauten CNG-4 Behälter der Firma *Ullit SA*, La Châtre, Frankreich, durch Innenbeschichtungen stark erhöht werden kann. Mit einer eigens angefertigten Permeationsmesszelle konnte nachgewiesen werden, dass die Diffusion durch das

PET-Linermaterial sehr temperaturabhängig ist, dünne Metall- oder Metalloxid-Filme jedoch als effiziente und anpassungsfähige Diffusionssperrschichten wirken, so dass die Diffusionsraten um mindestens eine Größenordnung verringert werden könnten.

Nutzung von Wasserstoff

Die Konsolidierung und die Erweiterung der Kompetenzen im Bereich einer effizienten und wirtschaftlich konkurrenzfähigen Nutzung von Wasserstoff bzw. eines auf Wasserstoff basierenden Energiesystems werden weiterhin mit hoher Priorität unterstützt. Es gibt jedoch noch nicht sehr viele technisch nutzbare Prozesse, welche dank Wasserstoff messbare Vorteile gegenüber konventionellen Prozessen aufweisen. Umso relevanter werden innovative Ansätze wie das an der ETH-Zürich laufende Projekt **Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen Kohlendioxid-Quellen** [11]. Zielsetzung des Projekts ist die Nutzung von anthropogenem Kohlendioxid als Rohstoff für chemische Synthesen. Dabei wird es zum einen als Kohlenstoffbaustein, zum anderen als Lösungsmittel (im überkritischen Zustand) genutzt. Im Berichtsjahr gelangen ausgehend von Kohlendioxid und Wasserstoff aussichtsreiche, auf selektiven Katalysatoren basierende Synthesen von Formamiden aus Aminen sowie von zyklischen Carbonaten. Auch die Substitution von oft umweltbelastenden konventionellen Lösungsmitteln durch überkritisches CO₂ ist ein Meilenstein auf dem Weg zu einer energie- und materialtechnisch synergetisch wirkenden Kreislaufwirtschaft.

KOMPLEMENTÄRE TECHNOLOGIEN

Selektive Absorbersysteme

Selektive Absorbersysteme gelten in der Gebäudetechnik nach wie vor als Komponenten mit einem hohen Energieeinsparpotential. Deshalb sind die im Projekt **Materialien für nachhaltige Technologien in der Energieumwandlung und Energieeinsparung** [12] untersuchten Komponenten in mehreren technischen Anwendungen bedeutend: (a) für die Abdeckung von Wärmekollektoren sowie (b) für Wärme absorbierende Fassadenelemente werden mittels Magnetron-Sputtering selektiv absorbierende bzw. reflektierende Metalloxidfilme auf Glas aufgebracht. Sie können je nach Herstellungsweise einen bestimmten, engen Wellenbereich des einfallenden Sonnenlichts reflektieren, den Rest transmittieren und so Energieverluste minimieren. Die Kontrolle der chemischen Zusammensetzung, die Abscheidungsparameter, der Schichtaufbau und die Re-

flektions- bzw. Transmissionseigenschaften sind Grundbedingung für eine optimale Funktionalität. Die Resultate der bisherigen Untersuchungen an Aluminium-, Silizium- und Titanoxidsystemen und ihrer Gemische sind erfolgversprechend.

Thermoelektrische Energiesysteme

Thermoelektrische Systeme erlauben die Umwandlung von thermischer Energie – die ihrerseits aus konzentrierter Solarstrahlung oder aber als Abwärme anfällt – in elektrische Energie. Das Prinzip ist seit langem bekannt und wird in technischen Produkten wie dem Peltier-Kühlschrank u.a. eingesetzt. Um hohe Wirkungsgrade zu ermöglichen, sind grosse Temperaturdifferenzen zwischen der heissen und der kalten Komponente des Systems erforderlich. Die gegenwärtig ge-

nutzten Materialien sind weder hochtemperaturbeständig noch chemisch inert. Deshalb werden im Projekt **Materials Development for Solar Thermoelectric Generators** [13] Materialien identifiziert und charakterisiert, die bei hohen Temperaturen einen hohen Seebeck-Koeffizienten, hohe elektrische und geringe thermische Leitfähigkeit aufweisen. Die Kombination dieser Anforderungen ist extrem anspruchsvoll. Im Berichtsjahr konnten trotzdem verschiedene komplexe Cobaltoxide synthetisiert und betreffend der genannten Eigenschaften spezifiziert werden. Die Weiterführung dieses spannenden, aber gleichermassen anforderungsreichen Projekts wird zusammen mit den Programmen *Elektrizität* und *Umgebungswärme* weiter bearbeitet.

Nationale Zusammenarbeit

Während die Projektarbeiten des Programmteils *Solarchemie* naturgemäss an den Standorten Paul Scherrer-Institut Villigen und ETH Zürich konzentriert sind, werden die Projekte zum Programmteil *Wasserstoff* an sehr unterschiedlichen Standorten bearbeitet. Mit dem Verein **Hydropole** [14] steht jetzt aber ein Instrument zur Verfügung, mit dem zunehmend die Synergien zwischen Hochschulforschung und Industrietätigkeiten initiiert und – wo bereits vorhanden – verstärkt werden. Insbesondere sollen die Kompetenzen in den Bereichen massgeschneiderte Funktionsmaterialien und effiziente Prozess- und Produktionsketten gestärkt werden, was als wichtige Massnahme

zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit des Technologiestandorts Schweiz zu werten ist. In Kommunikationsplattformen wurde das Wissen über die schon vorhandenen Erfahrungen mit der Solar- sowie der Wasserstofftechnologie vermittelt. Im Bereich der unterstützenden Technologien führten die Projekte zur Speicherung von Energie mittels Druckluftsystemen sowie zur Erzeugung elektrischer Energie mittels thermoelektrischer Systeme zu direkten Kooperationen zwischen den Programmen **Elektrizität** und **Solarchemie / Wasserstoff**, aber auch zwischen der EMPA, der ETH Zürich und weiterer Partnerinstitutionen.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit war vielfältig und breit gefächert. Durch die Leitungsfunktion von Schweizer Experten in den beiden IEA-Programmen **SolarPACES** (Solar Power and Chemical Energy Systems) [15] und **Photoproduction of Hydrogen and Case Studies of Integrated Systems** [16] wurden nicht nur wichtige Beiträge zur Gestaltung der jeweiligen Forschungsprogramme eingebracht, sondern auch die Aktivitäten der BFE-Forschungsprogramme angemessen dargestellt und vernetzt. Insbesondere die an den verschiedenen Task-Meetings wie dem *SolarPACES*-Meeting in Oaxaca, Mexiko, zusammengetragenen Arbeitsberichte sind sehr aufschlussreich und belegen die gut koordinierten Forschungsfelder.

Mit den folgenden Institutionen fanden direkte Kooperationen statt:

Australian National University, Canberra

Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln

Solarforschungszentrum Odeillo, Frankreich

Solar Energy Research Center, The Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel

Plataforma Solar de Almería, Tabernas, Spanien

AG Solar, Nordrhein-Westfalen, Deutschland

Anwenderzentrum für Material- und Umweltkompetenz (AMU) sowie Wissenschaftszentrum Umwelt, Universität Augsburg

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Energiespeicherung mittels Drucklufttechnik

Im Projekt **Druckluft – ein Energiespeicher der Zukunft** [17] konnten wichtige Fortschritte erzielt werden: Das als Demonstration einer Druckluft-Energiespeicherung entwickelte Projekt hatte als Zielsetzung die Ausgestaltung und Untersuchung eines Strom–Luft–Strom–Wandlers mit einer Grenzleistung von 1500 W. Zusammenfassend kann bilanziert werden, dass das Hauptaggregat (Strom–Öl–Strom–Wandler) zufriedenstellend funktioniert. Ein Grossteil der Fragen bezüglich Ausgestaltung, Wirkungsgrade und Entwicklungsschwerpunkte konnte beantwortet werden, was als erfolgreicher Grundbaustein für das Speicherkonzept zu werten ist. Als abschlies-

sende Herausforderung, die der Bewertung und Analyse der Baustein-Kette des Wandlers (Hydroeinheit, Schwungrad, Steuerung, Kupplung, Motor/Generator) entspringt, hat sich die Problematik des elektrischen Teiles (insbesondere der drehenden Maschine) herausgestellt, zumal hier eine Art Wirkungsgrad-*Schallmauer* in Form der Eisenverluste um 10% der Nennleistung kaum zu durchdringen ist. Aufgrund der Tatsache, dass diese Energietechnologie als Produkt der Wasserstoffspeicherproblematik entstand, jetzt aber viel direkter mit der Speicherung von Elektrizität zu tun hat, wurde dieses Projekt in das entsprechende Forschungsprogramm transferiert.

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Das Programm **Solarchemie / Wasserstoff** konnte im Berichtsjahr recht erfolgreich weitergeführt werden. Viele der anvisierten Ziele wurden erreicht und es kamen einige neue Themenfelder hinzu. Im Bereich Wasserstoffbereitstellung mittels photokatalytischer bzw. photoelektrochemischer Prozesse konnten abermals wichtige materialtechnische Fortschritte erzielt werden. Sollte es gelingen, die Resultate des Forschungsverbands zwischen den Universitäten Bern und Genf sowie der EPF Lausanne optimal zu koordinieren und zielgerichtet in technische Einheiten umzusetzen, so dürften in absehbarer Zeit effiziente und stabil arbeitende Einheiten realisierbar sein. Dies gilt in verstärktem Mass bzw. mit hohen Erwartungen für die Wasserstoffherstellung aus Biomasse. Dieser Prozess ist insbesondere von grossem Interesse, als sich damit voraussichtlich auch grosse Mengen von Wasserstoff generieren lassen. Die Wasserstoffspeicherung ist technisch an sich lösbar, sei es in chemischer oder physikalischer Weise. Da die Wirtschaftlichkeit, aber auch die Nachfrage bzw. der Bedarf noch nicht gegeben sind, fällt es schwer, Industriepartner zu finden, die eine technische Umsetzung tatkräftig unterstützen. Es ist wohl so, dass sehr viel über Wasserstofftechnologie gesprochen wird und rund um den Globus zahlreiche Konferenzen zu diesem Thema stattfinden. Zudem belegen die in der Wasserstoffforschung erzielten Resultate die hohe Kompetenz der schweizerischen Akteure.

Auf der anderen Seite verschlechtern sich die Rahmenbedingungen durch massive Kürzungen der Forschungs- und P+D-Mittel. Für die Wahrung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit des Technologiestandorts Schweiz sollten Kernkompetenzen der Schweizer Forschung und Industrie wie Funktionsmaterialien und Prozesstechnik durch das Programm *Solarchemie / Wasserstoff* weiterhin gefördert werden.

Die erfolgreiche Weiterführung der Arbeiten im Bereich Solarchemie erfordert nach wie vor eine optimale Koordination der Aktivitäten zwischen PSI, der ETH Zürich, der EPF Lausanne und der EMPA. Die personellen Veränderungen und Perspektiven sehen positiv aus, so dass bei einer kontinuierlichen Förderung die gesteckten Ziele, d.h. die ökologisch und ökonomisch effiziente Bereitstellung von regenerativen Energieträgern, auf gutem Weg sind.

Im internationalen Vergleich geniessen die schweizerischen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in der Solarchemie als auch in der Wasserstofftechnologie eine bemerkenswerte Anerkennung. Dies wird auch durch die grosse Präsenz in entsprechenden Fachzeitschriften ersichtlich (siehe z.B. den Übersichtsartikel zu Titanoxid [18]). In den kommenden Jahren sollte es jedoch noch vermehrt gelingen, Synergien zwischen Hochschulen und Industrie zu etablieren, welche eine raschere Umsetzung von Forschungsergebnissen in praktische Technologien erlauben.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

- [1] G. Calzaferri (gion.calzaferri@iac.unibe.ch) UNI Bern: **Photochemische, photoelektrochemische und photovoltaische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie** (JB).
- [2] M. K. Nazeeruddin und M. Grätzel (michael.graetzel@epfl.ch) EPF-Lausanne: **Generation of Hydrogen by Water Splitting with Visible Light** (JB).
- [3] J. Augustynski (Jan.Augustynski@chiam.unige.ch) M. Ulmann, UNI Genève: **La photolyse de l'eau et la production d'hydrogène et d'oxygène au moyen de l'énergie solaire** (JB).
- [4] M. Sturzenegger (m.sturzenegger@psi.ch) I. Alxneit, H. R. Tschudi, PSI Villigen: **Solarchemische Beiträge zur Reduktion des CO₂-Ausstosses** (JB).
- [5] D. Cannavò und T. Gerber (thomas.gerber@psi.ch) PSI Villigen: **Darstellung und Spektroskopie von ZnO bzw. Zn_xO_y in der Gasphase** (JB).
- [6] S. Biollaz (serge.biollaz@psi.ch) M. Sturzenegger und S. Stucki, PSI Villigen: **Sauerstoff-Transfer-Materialien für die Biomassevergasung** (JB).
- [7] A. Züttel (andreas.zuettel@unifr.ch) UNI Fribourg: **Wasserstoffspeicherung in Metall- und komplexen Hydriden** (JB).
- [8] K. Yvon (klaus.yvon@cryst.unige.ch) UNI Genève: **Destabilisation of metal hydride complexes and theoretical modeling** (JB).
- [9] A. Züttel (andreas.zuettel@unifr.ch) UNI Fribourg: **Demonstration eines Metallhydrid Speichers in einem mit Wasserstoff angetriebenen Pistenfahrzeug** (SB).
- [10] E.M. Moser (e.m.moser@eig.ch) Incoat GmbH, Löhningen und Ecole des Ingenieurs, Genève: **Hydrobar – Diffusionssperrschichten für Wasserstoff** (SB).
- [11] A. Baiker (baiker@tech.chem.ethz.ch) ETH-Zürich: **Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen Kohlendioxid-Quellen** (JB).
- [12] Shui-Ching Ho, G. Reber, D. Kohler, R. Steiner und P. Oelhafen, (peter.oelhafen@unibas.ch) UNI Basel: **Materialien für nachhaltige Technologien in der Energieumwandlung und Energieeinsparung** (SB).
- [13] A. Weidenkaff und R. Robert (anke.weidenkaff@empa.ch) EMPA Dübendorf: **Materials Development for Solar Thermoelectric Generators** (JB).

Liste der P+D-Projekte

- [14] **Hydropole** (www.hydropole.ch) Schweizerisches Wasserstoff-Kompetenzzentrum (JB).
- [15] A. Steinfeld (aldo.steinfeld@psi.ch) ETH Zürich: **Leitung des IEA-Programms SolarPACES** (Solar Power and Chemical Energy Systems) (JB).
- [16] A. Luzzi (andreas.luzzi@solarenergy.ch) SPF TH Rapperswil: **Leitung des IEA-Programms Photoproduction of Hydrogen and Case Studies of Integrated Systems** (JB).
- [17] W. Cyphelly (cmr@ran.es) Les Brenets und P. Brückmann (brueckmannelektronik@bluewin.ch) Davos: **Druckluft - Ein Energiespeicher der Zukunft** (JB).

Referenzen

- [18] O. Carp, C.L. Huisman and A. Reller (armin.reller@physik.uni-augsburg.de): **Photoinduced Reactivity of Titanium Dioxide**, Progr. Solid State Chem. 32 (2004) 33 – 177.

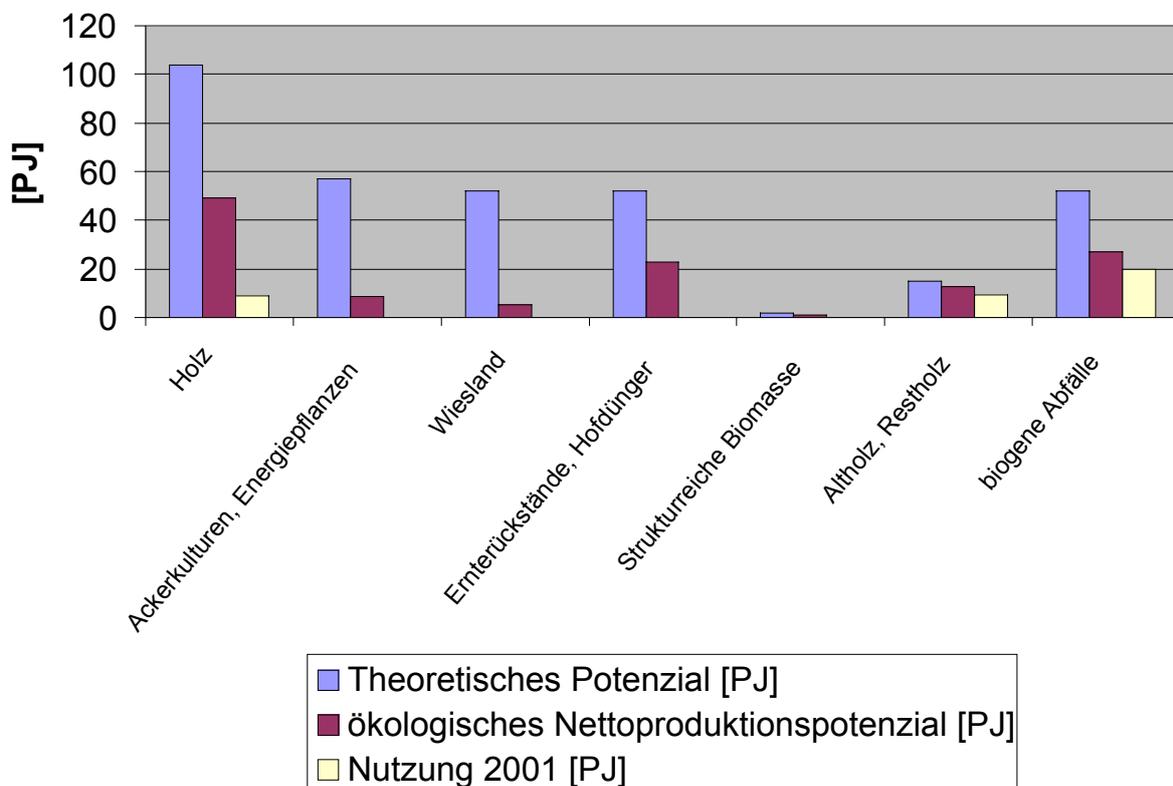
BIOMASSE

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Daniel Binggeli
daniel.binggeli@bfe.admin.ch

Bruno Guggisberg
bruno.guggisberg@bfe.admin.ch

Biomassepotenzial 2040



Biomassepotenzial in der Schweiz bis 2040

Insgesamt kann die Biomassenutzung von heute knapp 40 PJ bis 2040 auf verträgliche Weise verdreifacht werden. Die Daten stammen aus der Studie *Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz*, Infraset al. 2004 [35].

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. Der Energieträger Biomasse soll möglichst ökologisch und ökonomisch, mit einer maximalen Substitutionswirkung fossiler Energieträger, eingesetzt werden. Der Anteil der Biomasse am schweizerischen Endverbrauch erbrachte 2003 rund **4.1%** (thermisch und elektrisch). Dies entspricht einem Anteil am Endverbrauch der erneuerbaren Energien von **25%**. Das mittelfristige politische **Ziel** des Bundes ist jedoch eine **Verdoppelung der energetischen Nutzung** von Biomasse.

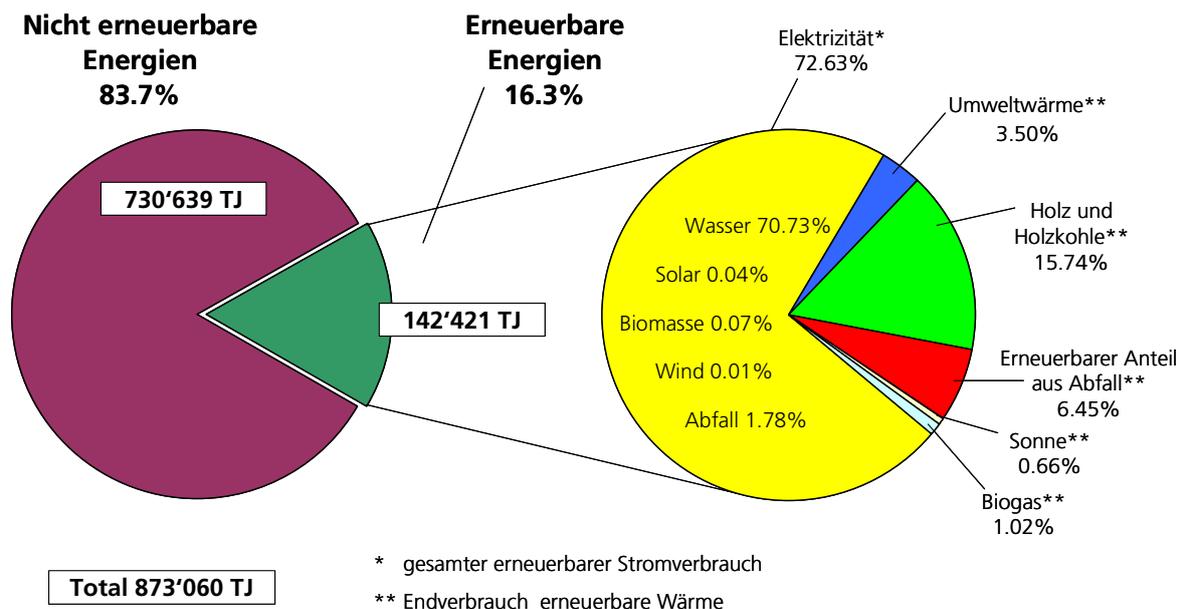
Die verfügbare Menge an Biomasse und damit das theoretische Potenzial ist in der Schweiz auf Grund der Landesgrösse und der klimatischen Verhältnisse beschränkt. Das unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte energetisch nutzbare Langfristpotential (ökologisches Nettoproduktionspotential 2040) beträgt gemäss einer neuen Studie [35] rund **126 PJ**. Das heutige ökologische Potenzial liegt bei ca. **123 PJ**, wird jedoch lediglich zu knapp **einem Drittel (37 PJ)** energetisch genutzt.

Die Steigerung der energetischen Nutzung von Biomasse kann grundsätzlich über 5 Wege erfolgen:

- verstärkte Nutzung** der vorhandenen Potenziale in der Schweiz gemäss Biomasse-Potenzialstudie (insbesondere Holz, Ernterückstände und Hofdünger)
- Erhöhung der **Gesamtnutzungsgrade**
- Optimieren** der biogenen **Stoffflüsse** (u.a. Kreisläufe schliessen)
- Ausscheiden von Agrarflächen für Anbaurohstoffe (Energiepflanzen), ggf. Kombination der energetischen Nutzung mit ökologischen Ausgleichs- oder Brachflächen sowie Nutzung von Stilllegungsflächen
- Import von Biomasse zur energetischen Nutzung unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte

PROGRAMMSCHWERPUNKTE

Drei Schwerpunkte: (a) verstärkte Nutzung von Biomasse, (b) Verbesserung der Gesamtwirkungsgrade und (c) Optimieren der biogenen Stoffflüsse wurden für Forschung und deren Umsetzung festgelegt, unter Berücksichtigung der Systemgrenze Schweiz, den gesetzlichen Rahmenbedin-



Figur 1: Aufteilung des gesamt-schweizerischen Endenergieverbrauchs 2003 auf erneuerbare und nicht erneuerbare Energiequellen (*Strom; **Wärme). Die Energie aus Biomasse wird im Endverbrauch zum grössten Teil **thermisch** (ca. 90 %), dann **elektrisch** (ca. 9 %) und zu einem geringen Anteil als **Treibstoff** (<1%) genutzt.

gungen und des Konzepts der Energieforschung des Bundes 2004-2007 [34].

Zur energetischen Nutzung stehen aufgrund der Potenzialstudie [35] und der gesetzten Schwerpunkte folgende **Biomassesortimente** im Vordergrund: Holz, Ernterückstände/Hofdünger, biogene Abfälle und Anbaurohstoffe auf ökologischen Ausgleichs- oder Brachflächen sowie Stilllegungsflächen. Als **Prozesse und Umwandlungstechnologien** stehen Verbrennen, Vergasen und Vergären im Mittelpunkt.

ANVISIERTE ZIELE

Generelles und langfristiges Ziel ist die Verbesserung der Voraussetzungen für die vermehrte energetische Nutzung der Biomasse. Um dieses Ziel zu erreichen gibt es für die Forschung folgende Ansatzpunkte:

- Steigerung der Energieeffizienz des Gesamtsystems (d.h. von der Primärenergie zur maximalen Nutzenergie)
- Entwicklung wirtschaftlicher Anlagen und Systeme
- Reduktion von ökologischen Auswirkungen (z.B. Emissionen)

- Aufbau und Erhalt einer Qualitätssicherung und Aus- und Weiterbildung

Im Berichtsjahr wurden folgende Ziele anvisiert:

- Grundlagen-, Qualitätssicherungsprojekte und Erfolgskontrollen durchführen in Technik und durch Aus- und Weiterbildungstagen bekannt machen
- Know-how für Planung, Bau und Betrieb zur Anwendung in privaten, industriellen, kommunalen und landwirtschaftlichen Biomasseanlagen ausbauen
- Begleitforschung für Holz-Vergasungsanlagen sicher stellen
- Auswerten von bestehenden P+D-Anlagen im Bereich landwirtschaftlicher Co-Vergärung
- Kontrolliertes Herunterfahren des P+D-Programms bzw. Neupositionierung als Teil des Technologietransfers
- generell grössere Projekte mit besonderer Bedeutung unterstützen, Mittel konzentrieren
- neue Erhebung des Biomassepotenzials in der Schweiz für die Ausrichtung der F+E-Strategie und für die politische Diskussion

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

BIOMASSE UMWANDELN

a) Biomasse verbrennen und vergasen

Die **Systemoptimierung automatischer Holzfeuerungen** [1a] hat zum Ziel, dass bestehende automatische Holzfeuerungen optimal betrieben werden. Den Schwerpunkt bilden Holzkessel zwischen 300 kW und 1 MW, die seit mindestens fünf Jahren in Betrieb sind. Beurteilt werden die Bereiche Brennstoff, Technik und Betrieb in Bezug auf technische und wirtschaftliche Optimierung. Als Verbesserungsmöglichkeiten werden betriebliche und logistische Massnahmen aufgezeigt und wo möglich umgesetzt. Für Massnahmen mit Investitionsfolgen werden Potenzial und Kosten aufgezeigt und die Realisierung unterstützt. Die Erkenntnisse der Systemoptimierung wurden bei der Erarbeitung des Handbuchs QM Holzheizwerke berücksichtigt, an Symposien und Planungskursen an Fachleute vermittelt und in Zeitschriften und Tagungsbänden publiziert.

Partikel aus vollständiger Holzverbrennung sind grösstenteils Salze, während Partikel von Diesel-

motoren hauptsächlich aus Russ bestehen. Das interdisziplinäre Forschungsprojekt **Wirkung von Verbrennungspartikeln** [1b] soll einen Beitrag liefern zum Vergleich der Gesundheitsrelevanz von Abgaspartikeln aus vollständiger Holzverbrennung, aus unvollständiger Holzverbrennung sowie aus Dieselmotoren. Dazu werden die Zytotoxizität und die Mutagenität (Punkt-Mutagenität und klastogene Mutagenität) der Partikel mit in-vitro Tests beurteilt. Das Projekt basiert auf einem Screening, das keine umfassende Beurteilung der Gesundheitsrelevanz, jedoch erste Anhaltspunkte und Erfahrungen für vertiefte Abklärungen liefern soll. In der Berichtsphase wurde die Probenahme an einer automatischen Holzfeuerung und an einem modernen PW-Dieselmotor ohne Partikelfilter durchgeführt. Im Weiteren wurden die Probenaufbereitung evaluiert sowie erste Zelltests durchgeführt und ausgewertet. Die Evaluation einer geeigneten Probenaufbereitung war ein wichtiger Schritt der bisherigen Untersuchung, da dazu kein standardisiertes Verfahren zur Verfügung stand. Das evaluierte Verfahren durch Extraktion im Zell-Medium zeichnet sich dadurch

aus, dass kein thermischer Prozess-Schritt notwendig ist und keine Körperfremde Flüssigkeit zugegeben wird. Erste Zytotoxizitätstests an V79-Zellen zeigen, dass sowohl bei den Diesel- als auch bei den Holzfeuerungsproben zytotoxische Reaktionen auftreten. Quantitative Aussagen sind für das Jahr 2005 vorgesehen.

Da Feinstäube zusammen mit Ozon das grösste Problem der Luftreinhaltung sind und Holzfeuerungen im Vergleich zu anderen Heizsystemen hohe Staubemissionen aufweisen, besteht ein Bedarf an Massnahmen zur Staubminderung bei Holzfeuerungen. Im Rahmen des Forschungsprojekts *Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen* [36] wurde ein Low-Particle-Konzept zur Verbrennung von Holz entwickelt, das im Vergleich zu einer konventionellen Verbrennung eine Verminderung der Staubemissionen um rund 50% bis 80% ermöglicht. Im Projekt Low-Particle-Pelletfeuerung [1d] wurde das Low-Particle-Konzept für den Einsatz bei Pelletfeuerungen im Leistungsbereich von 100 kW bis 500 kW untersucht. An einer Prototypanlage konnten durch Primärmassnahmen, Verminderungen der Staubemissionen zur sicheren Einhaltung eines Staubgrenzwertes von 50 mg/m_N^3 (bei 13 Vol.-% O_2) erreicht werden. Das Projekt wurde erfolgreich abgeschlossen.

Aufbauend auf den vorgängigen Untersuchungen zum Low-Particle-Konzept soll nun eine **Low-Particle Unterschubholzfeuerung** [1e] zur Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln für den Leistungsbereich von 200 kW bis 800 kW entwickelt werden. Bei Wald- und Sägerestholz mit Rindenanteil von unter 5 Gew.-% sollen Partikel-emissionen vor Zyklon von unter 50 mg/m_N^3 (bei 13 Vol.-% O_2) erreicht werden. Dazu soll eine Prototypanlage mit einer Leistung von 300 kW realisiert und ausgetestet werden. Im Berichtsjahr wurden das Anlagen- und das Regelungskonzept entworfen. Anfangs 2005 soll die Prototypanlage gebaut und nach einer Optimierungsphase eine umfangreiche Erfolgskontrolle durchgeführt werden.

Im Projekt **Bio-Pro** (BBW Nr. 03.0564-1) [3] fokussiert sich der Schweizer Partner auf die Entwicklung der Brennertechnologie mit flammloser Oxidation der Firma WS-Wärmeprozess-technik (D). In einem ersten Schritt galt es, den Verbrennungsprozess des Prototypenbrenners auf den vom Projektkonsortium definierten Referenzbrennstoff Erdgas zu untersuchen. Prozesstechnisch konnte der Brennerstart vereinfacht werden. Dadurch gelang es, die Aufheizphase der Brennkammer auf die erforderliche Prozesstemperatur für die flammenlose Verbrennung zu verkürzen. Die Emissionswerte des Referenzbrennstoffs Erdgas unterschritten für

NO_x mit 5 bis 30 mg/m_N^3 den Zielwert von 40 mg/m_N^3 deutlich. Die Kohlenmonoxidwerte erreichten bis 5 mg/m_N^3 bei einem Zielwert von 10 mg/m_N^3 . Ein zweiter Projektschritt beinhaltete den Betrieb des Brenners mit Gasen von geringem Heizwert bis um 5 MJ/m_N^3 . Es wurde eine Mischeinrichtung aufgebaut, mit der sich aus Erdgas und Abgas, Schwachgas mit verschiedenen Heizwerten erzeugen lässt. In Versuchsreihen konnte gezeigt werden, dass sich der flammlose Betrieb auch mit Brenngasen mit geringem Heizwert einstellt. Die NO_x -Emissionen lagen unter denen des Referenzbrennstoffs Erdgas.

Im Rahmen des BFE-Projekts *QM Holzheizwerke* wurden Standard-Schaltungen für Holzheizungsanlagen definiert. Diese beschreiben zwar generell die Schnittstellen, das Regelkonzept und die Messdatenerfassung zur Betriebsoptimierung, die detaillierte Planung und Realisierung wird jedoch weitgehend den beteiligten Firmen überlassen. Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass hier noch wichtige Fragen offen sind, die durch **Messungen an einer Anlage mit Speicher in Azmoos** [5] geklärt werden sollen. Die Datenerfassung und Datenauswertung zur Erprobung der beiden Regelkonzepte im Winterbetrieb haben im Januar/Februar und März/April 2004 stattgefunden. Die Datenerfassung und Auswertung für die Übergangszeit haben jedoch keine befriedigende Aussagen ergeben, so dass im November/Dezember 2004 nochmals Erhebungen stattfinden. Der Schulssbericht ist für März 2005 angemeldet.

Das bei einigen Holzvergäsern entstehende Rohgas wird meist in einer Waschanlage gereinigt und abgekühlt, wobei Phenole, Cyanide und Ammonium entfernt werden. Das so anfallende belastete Wasser wird meist intern recycelt, doch bedingt durch die Holzfeuchte müssen mehrere m^2 Wachaasser pro Tag aus dem Kreislauf entfernt werden. Die HSW untersuchte im Projekt **Verfahren zur Aufbereitung von Abwasser aus der Holzvergasung zu Nutzwasser in Polykulturen** [4] die Nutzung des bei der Holzvergasung anfallenden Abwassers in einem Gewächshaus zur Fisch- und Pflanzenproduktion (Aquaponic). Die vorliegende Studie zeigt, wie ein naturnahes Verfahren entwickelt werden kann, in dem das Wachaasser soweit gereinigt wird, dass es problemlos in den Kulturen des Gewächshauses als Düngemittel eingesetzt werden kann.

b) Biogene Abfälle vergären

Energie à partir du petit-lait: comparaison des filières biogaz et bioéthanol [6]: Zwei Energierückgewinnungsmodelle sind in der Schweiz für die Verwertung der jährlich rund 1.5 Mio. m^3

Molke vorstellbar: Die Produktion von Biogas und die Produktion von Bioethanol. Die erste Phase des Projekts verfolgte das Ziel, ein Konzept für die Gewinnung von Biogas in einer Käserei mittlerer Grösse zu erstellen. Die Studie hat erlaubt, die optimalen Prozessparameter und Leistungsparameter zu definieren. Damit konnte auch experimentell 95 % des theoretisch möglichen maximalen Methanertrages erreicht werden. Die anschließende Analyse der Energieverwendung hat ergeben, dass die Wärmeproduktion mittels Biogas die rentabelste Verwendung ist und damit rund 2/3 des jährlichen Heizölverbrauchs der betroffenen Käserei ersetzt werden könnte. Die zweite Phase wurde in Zusammenarbeit mit *Alcosuisse* und dem *Laboratoire des Systèmes Energétiques* der EPFL durchgeführt. Die Produktion von Bioethanol macht nur in grossen Verarbeitungszentralen Sinn, die bis zu 100 mal grössere Mengen verarbeiten können als die für die Biogasgewinnung ausgewählte Anlage. Die Kosten der beiden Verarbeitungsmethoden sind mit 26 - 27 CHF pro m³ Molke vergleichbar, ebenso die Einsparung fossiler Energie von rund 20 L Erdöl Equivalent und damit einer Emission von 60 kg fossilem CO₂. Die zwei beschriebenen Prozesse können demzufolge als komplementär betrachtet werden und sollten je nach Grösse und/oder Nähe des Produktionsstandortes ausgewählt werden.

Vorstudie «Ökobilanz von Energieprodukten» [8a]: 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. Im Rahmen dieser Vorstudie sind Vorabklärungen erfolgt und wichtige Entscheidungsgrundlagen für die Ausschreibung der Hauptstudie erarbeitet worden. Der definitive Schlussbericht liegt vor.

In der ersten Phase der **Hauptstudie «Ökobilanz von Energieprodukten»** [8b] werden nun die fehlenden Sachbilanzdaten für Energieprodukte aus Biomasse erhoben und in die ecoinvent-Datenbank integriert. Im Berichtsjahr wurde eine Ausschreibung zu verschiedenen Teilpaketen durchgeführt und die eingegangenen Angebote ausgewertet. Für die Projektbearbeitung zu den Themen *Biogas*, *BTL/synthetische Treibstoffe*, *Öl*, *Transport* und *Sonstige* wurden Projektbearbeiter ausgewählt. Das Projekt wird in Zusammenarbeit mit dem BUWAL und dem BLW durchgeführt.

Valorisation énergétique de matières organiques (VEMOT) – Avant projet [10]: Bei der Produktion von Biodiesel (Rapsmethylester – RME) fallen unter anderem flüssige, organisch hoch belastete Abfälle an. Die Entsorgung via Kläranlage ist aufgrund der Toxizität problematisch. Im Rahmen von bereits durchgeführten Studien und Laborversuchen wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem diese toxischen Reste biologisch abgebaut werden können und gleichzeitig Energie in Form von Biogas anfällt. Das Verfahren kann auch für die Behandlung ähnlicher Abwässer z.B. aus der Chemie- und Pharmaindustrie eingesetzt werden. Im Rahmen der Vorstudie wurde unter anderem nach weiteren potenziellen Lieferanten solcher Abfälle gesucht und geeignete Standorte für eine erste Pilotanlage evaluiert.

Vergärung von Gülle im Membran-Bioreaktor (MBR-Messkampagne) [11]: Ziel des Projektes ist die Abklärung der Eignung des Membranreaktors (MBR) im Einsatz mit Gülle sowie mit Gülle und Co-Substraten. Anhand einer Versuchsanlage sollen Erkenntnisse erarbeitet werden, die in den Betrieb der P+D-Anlage einfließen sollen. Verschiedene Komponenten, wie die Fest-Flüssig-Trennung und die Membrantrennung sind in einer Versuchsanlage installiert und in Betrieb gesetzt worden. Die Erkenntnisse aus dem Vorprojekt *Membranevaluation* [37] stellen die Basis für die beiden Projekte MBR-Pilot und MBR-Messkampagne dar.

Messkampagne für eine solare Klärschlamm-trocknungsanlage in Bilten GL [12]: Die ARA Bilten reinigt die Abwässer des Kantons Glarus (70'000 EW), wovon etwa die Hälfte aus der Industrie stammen. Die untersuchte Anlage besteht aus zwei Trocknungshallen (je 10 x 72 m) und einer gedeckten Lager- und Verladefläche. Wichtigstes Ziel der vorliegenden Studie war das Erstellen einer Massen- und Energiebilanz für die solare Klärschlamm-trocknungsanlage der ARA Bilten. Dazu wurden im Rahmen einer drei Jahre dauernden Messkampagne (November 1999 bis Dezember 2002) Betriebs- und Meteorodaten ausgewertet. Nebst der Überprüfung der Wirtschaftlichkeit liefert die Studie Beiträge zur Optimierung des Verfahrens und zeigt, wie das Verfahren hilft, Energieverbrauch und Transportaufwendungen zu reduzieren. Ferner dokumentiert sie die im Rahmen des Projektes erfolgte Öffentlichkeitsarbeit. Das in Bilten eingesetzte Verfahren eignet sich für den Einsatz mit entwässertem Klärschlamm (TS-Gehalt 20% und höher). Mehr als die Hälfte des nach der Entwässerung noch im Klärschlamm enthaltenen Wassers kann in der untersuchten Anlage verdunstet werden. Die Entsorgungskos-

ten können massiv reduziert und die Anlage kann wirtschaftlich betrieben werden. Der definitive Schlussbericht liegt nun vor.

Machbarkeitsstudie für die energetische Nutzung von gebrauchten, unbehandelten, pflanzlichen Fetten aus der Gastronomie der Region St. Moritz [13]: Das Energiestadtprojekt St. Moritz sowie das Projekt *Clean Energy St. Moritz* haben sich zum Ziel gesetzt, den Energiebedarf wo möglich zu optimieren bzw. einen grossen Teil der benötigten Energie in einer energieintensiven touristischen Region wie St. Moritz möglichst mittels erneuerbarer Erzeugung zu gestalten. Im Rahmen dieser beiden Projekte sollte geklärt werden ob die gebrauchten unbehandelten, pflanzlichen Fette aus der Gastronomie, welche momentan von einer Firma in Liechtenstein entsorgt werden, zur lokalen Energiegewinnung genutzt werden können. Es hat sich gezeigt, dass sich die in St. Moritz und der Region anfallenden rund 72 Jahretonnen aus technischer und wirtschaftlicher Sicht nicht direkt zur lokalen energetischen Verwertung in einem BHKW eignen. Als Alternative sollte jedoch die Verwendung der pflanzlichen Öle und Fette als Co-Substrat in einer Vergärungsanlage wie z.B. die ARA in Celerina oder die geplante Gastro Kompakt-Biogasanlage des Hofes Lej Ovischel in Surlej in Betracht gezogen werden. Dies würde ohne grosse Zusatzinvestitionen zu einem erheblichen Mehrertrag dieser Anlagen führen und somit einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien sowie zur Reduktion der CO₂-Emissionen in der Region St. Moritz beitragen.

Bau und Betrieb einer Perkolationsanlage zur Aufbereitung von Bioabfällen [14]: Mit dieser Arbeit sollte gezeigt werden, dass Grüngut mittels Perkolation und anaerober Vergärung - einem Verfahren, welches für Restmüll entwickelt wurde - effizient zu Kompost und Biogas umgesetzt werden kann. Das Perkolationsverfahren besteht im Prinzip aus einem Perkolator, in dem das Abfallmaterial aerob aufbereitet und die gelösten Substanzen bei 45° bis 50°C ausgewaschen werden, sowie einem mesophilen Biogasfermenter, in dem die Reinigung des beladenen Waschwassers stattfindet. Dabei setzen Methanbakterien die gelöste Organik zu Biogas um. Das gereinigte Waschwasser wird anschliessend in den Perkolator rezykliert. Ziel der vorliegenden Arbeit war die deutliche Steigerung der Effizienz der Perkolation von Grüngut und der anschliessenden Vergärung durch Optimierung chemisch-physikalischer, verfahrenstechnischer und mechanischer Parameter. Die Ergebnisse zeigen, dass Grüngut mittels einer Perkolationsanlage effizient behandelt werden

kann. Innerhalb von 3 bis 4 Tagen Behandlungszeit werden 75% des Gasertrages erreicht im Vergleich zu einer konventionellen Vollvergärung, welche 12 bis 20 Tage Aufenthaltszeit benötigt. Zudem ist das ausgelaugte Material bereits aerob und damit ohne NH₄-belastete Abluft. Damit kann auf eine geschlossene Halle mit Abluftbehandlung verzichtet werden. Trotz reduziertem Gasertrag ist der ganze Prozess energetisch immer noch positiv. Der definitive Schlussbericht liegt nun vor.

Teilstatistik Biogas 2003 [15]: In der Biogasstatistik 2003 wurden die Daten der Produktion und Nutzung von Biogas der Bereiche Landwirtschaft, Industrieabwasservorreinigung, Bioabfallvergärung sowie Co-Vergärung in den Faulanlagen von Kläranlagen präsentiert und kommentiert. Die Daten sind in die Statistik der erneuerbaren Energien 2003 eingeflossen.

Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz [16]: In der Schweiz werden jährlich rund 600'000 t biogene Abfälle zu hochwertigem Kompost verarbeitet und so in den Stoffkreislauf zurückgeführt. Die Kompostierung ist damit von grosser ökologischer und volkswirtschaftlicher Bedeutung. Mit den Ausgangsmaterialien können auch unerwünschte Substanzen (organische Schadstoffe und Schwermetalle) in den Kompost gelangen. Im Rahmen dieses Gemeinschaftsprojekts mit dem BUWAL soll eine solide Datenbasis als Grundlage für Qualitätssicherung und Risikomanagement erarbeitet werden. Der Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung wird massgeblich mit potenziellen, nicht genügend bekannten Auswirkungen des Eintrags von organischen Schadstoffen durch Klärschlammdüngung in die Böden begründet. Eine ähnliche Entwicklung muss bei Kompost und Gärgut wegen deren grossen ökologischen und volkswirtschaftlichen Bedeutung vermieden werden.

Auswirkungen von Komposten und Gärgut auf die Umwelt, Bodenfruchtbarkeit und Pflanzengesundheit [17]: 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 und der FAL koordiniert.

c) Biotreibstoffe

SwissFarmerPower (Projekt prix pegasus)

[18]: Das Planungsprojekt zum Bau der ersten Aufbereitungsanlage, in welcher in einer Prozesskette Biogas produziert, zu Erdgasqualität aufbereitet und ins lokale Erdgasnetz eingespeist wird sowie mit der nachgeschalteten technischen GÜlleaufbereitung die Nährstoffe (N, P, K) gezielt in einen handelbaren Dünger extrahiert werden sollen, wurde erfolgreich gestartet. In mehreren Teilprojekten und mit einer breit abgestützten Trägerschaft bestehend aus Firmen der Bereiche Mischfutterhandel, Tiervermarktung, Düngerindustrie, diversen Fachorganisationen sowie dem Gemeindeverband Kehrlichtbeseitigung Region GKLÜ, den Luzerner Bauern und den Behörden des Kantons Luzern, wird die erste Anlage im Kanton Luzern geplant. In der Berichtsperiode bildeten, nebst der Konstitution der Trägerschaft, Abklärungen betreffend der Marktsituation bei den Co-Substraten, mögliche Standorte und die Vermarktung von Energie und Gärresten (Dünger) den Schwerpunkt. Die Finanzierung der ersten Anlage muss bis spätestens Ende Februar 2005 gesichert sein, um den Fahrplan für die Realisierung einhalten zu können.

Methan aus Holz [19a]: Das Projektteam will innerhalb von 8 Jahren eine 20 MW_{th}-Anlage realisieren, welche erdgasnetztaugliches Methan aus Holz zu wirtschaftlich interessanten Bedingungen herstellen kann. Der nächste Schritt auf dem Weg zur Realisierung einer solchen Anlage ist die Erbringung des techno-ökonomischen Nachweises im kW-Massstab. Dazu wurde am PSI eine Pilotanlage (2 bis 10 kW) errichtet, welche u.a. für Langzeitversuche (1000 h) geeignet ist. Diese Pilotanlage ist im Jahr 2004 in Güssing am FICFB-Vergaser (Fast Internally Circulating Fluidized Bed) verknüpft worden. Das Ziel von 1000 h Betrieb konnte nicht erreicht werden, weil zweimal nacheinander der Katalysator nach

200 h ausgetauscht ist. Der theoretisch maximale Umwandlungswirkungsgrad in einer Grossanlage wird ohne Eigenenergieverbrauch und Einspeisung ins Erdgasnetz mit ca. 58% angegeben. Der erste Teil des Projekts wird bis Frühjahr 2005 abgeschlossen.

Im Projekt **Biogenes Methan durch hydrothermale Vergasung** [19b] wird ein hydrothermales Vergasungsverfahren für nasse Biomassesortimente entwickelt, mit dem Ziel, die Biomasse vollständig zu Methan und CO₂ zu vergasen und Nährsalze zurückzugewinnen. Die Laborversuche mit 9-10 Gew% Holz in einem absatzweise betriebenen Hochdruck-Reaktor bei 390-400°C und ca. 300 bar waren erfolgreich. Es konnte gezeigt werden, dass Holz vollständig zu CH₄, CO₂ und H₂ vergast werden kann. In einem nächsten Schritt soll nun eine kontinuierliche Anlage gebaut werden, die unter anderem der Erprobung von Katalysatoren und der Nährsalzabtrennung dient. Im Berichtsjahr wurde ausserdem GÜlle chemisch auf den Anteil an anorganisch gebundenem Sauerstoff untersucht, der keinen Beitrag zur hydrothermalen Vergasung leistet.

Im Rahmen des Forschungsprojektes **RENEW** [8c] (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. Diese Bilanz wird kritisch begutachtet. Dabei wird der Zyklus von der Biomasse Produktion bis zur Bereitstellung des Kraftstoffs untersucht. Im Jahr 2004 wurde ein Überblick zu bereits durchgeführten Ökobilanzen erstellt und die Zieldefinition für die Ökobilanz von Biomass-to-liquid (BTL) fuels erarbeitet. Die Ökobilanz wird von der Firma *ESU-services* durchgeführt. Am Gesamtprojekt sind über 30 Partner aus Europa unter Federführung der *Volkswagen AG* beteiligt.

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 auf dem Gebiet von Ökobilanzen mit den Bundesämtern BUWAL, BLW und ARE zusammengearbeitet. Die Finanzierung von Projekten wird immer anspruchsvoller. Die Projektpartner werden nur teilfinanziert und

haben demzufolge ihr Interesse in Eigenleistungen auszuweisen. 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 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.

Zum Schwerpunkt Holzfeuerungen wurden zahlreiche Informations- und Ausbildungsanlässe durchgeführt. Im Frühjahr des Berichtsjahres fand das 4. *Kolloquium Klein-Holzfeuerungen* statt, im September anlässlich der Messe *Bauen und Modernisieren* das 4. *Pelletforum*, im Oktober das alle

2 Jahre stattfindende 8. *Holzenergie Symposium* und im November zwei Ausbildungstage zu *Holzheizwerke erfolgreich planen* und die Info-Veranstaltung *automatische Holzfeuerungen*. Weitere Ausbildungs- Informations- und Imageprojekte zur Verwendung der Ressource Biomasse fanden über die Biomasse-Partner vom energiepolitischen Aktionsprogramm EnergieSchweiz statt (www.holzenergie.ch, www.biomasseenergie.ch).

Internationale Zusammenarbeit

Die Vertretungen der Schweiz in der International Energy Agency (IEA), IA Bioenergy, Task 32: **Biomass Combustion and Cofiring** [1c], Task 33: **Thermal Gasification of Biomass** [2] und Task 37: **Energy from Biogas and Landfill Gas** [7] bezwecken den Erfahrungs- und Informationsaustausch, die Verbreitung der Informationen zur Produktion und Verwendung von den diversen Biomassesortimenten und Umwandlungstechnologien, die Anregung neuer Projekte in den Bereichen Forschung, Entwicklung, Pilot- und Demonstrationsanlagen und zur Markteinführung.

Die Aktivitäten wurden im Berichtsjahr in unveränderter Art weiterverfolgt.

Die EU nimmt mit ihren zahlreichen Programmen zukünftig eine immer wichtigere Rolle ein. Im Bereich *Biomasse* beteiligt sich die Schweiz an diversen Projekten. Die wichtigsten Projekte können über folgende Links eingesehen werden:

Biotreibstoffe[8c]: www.renew-fuel.com, *Gasification Network*: www.gasnet.uk.net, *QM-Holzheizwerke* [5]: www.qmholzheizwerke.ch, *Biopro* [3]: www.eu-projects.de

Pilot- und Demonstrationsprojekte

a) Biomasse verbrennen und vergasen

Beim Projekt **Pilotanlage von rund 500 kW Leistung zum Verbrennen von landschaftlicher Biomasse mit Holz** [20] handelt es sich um eine neue Holzfeuerung ausgestattet mit gekühltem Rost und mit gekühlten Seitenwänden, Abgasrückführung und mit Elektrofilter, bei der auch landwirtschaftliche Feststoff-Biomasse wie z.B. Getreidebruch, Müllereiabgang, Ernterückstände usw. beigemischt werden kann. Vorgängige Projekte haben gezeigt, dass landwirtschaftliche Biomasse alleine nicht einfach zu verbrennen ist. Es sind Mischverhältnisse diverser Sortimente (meist trocken, eher verholzt) mit dem Basisbrennmaterial Holz zu finden, bei welchem ein Dauerbetrieb möglich ist. Nach der Abnahme der Anlage sollen umfassende Verbrennungsversuche durchgeführt werden.

Der an der Empa entwickelte elektrostatische **Partikelabscheider für kleine Holzfeuerungen** [21] konnte ohne wesentlichen konstruktiven Mehraufwand für den Einbau in eine Cheminéeanlage der Firma *Rüegg Cheminée AG* adaptiert

werden. Verbesserungen an Elektrode und Steuergerät lassen eine hohe Zuverlässigkeit der Bauteile erwarten. In den durchgeführten Labortests wurden die anvisierten Ziele bezüglich Abscheideeffizienz erreicht. Die Cheminéeanlage wurde durch die Firma *Rüegg Cheminée AG* neu erstellt und der Partikelabscheider inklusive der vorgesehenen Messstellen eingebaut. Die Anlage wurde in Betrieb genommen und der Start des Messprogramms ist erfolgt. Ein weiterer Partikelabscheider, ein Rohr-Elektrofilter, für den Leistungsbereich von 200 kW bis 1,5MW soll ab 2005 entwickelt und gebaut und ausgemessen werden.

Mit dem **Forschungs- und Begleitprojekt an der Holzvergasungsanlage Pyroforce im AC-Zentrum Spiez** [22] kann mittels Contracting die Anlage weiter betrieben werden. Die vollständig im System eingebundene Vergaser-Pilotanlage hat bis heute rund 8'500 Stunden Betrieb mit dem Reaktor und rund 6'300 Stunden mit der Wärme-Kraft-Kopplungsanlage. Weitere Anpassungen zur Betriebsverbesserung sollen ab 2005 an diversen Anlagenteilen durchgeführt werden.

b) Biogene Abfälle vergären

Vergärung von Gülle im Membran-Bioreaktor (MBR-Pilot) [23]: Anstelle der ursprünglich geplanten P+D-Anlage zur Vergärung von Schweinegülle und Abfällen mit einer Verarbeitungskapazität von 15'000 Jahrestonnen, wird aufgrund der veränderten Marktverhältnisse eine Anlage mit rund 25'000 Jahrestonnen realisiert. Der Spatenstich zum Bau der Anlage ist Ende Berichtsjahr erfolgt. Die Inbetriebnahme ist für Ende 2005 vorgesehen.

Lupo AG – Biogasverwertung mit BHKW [24]: In der anaeroben Abwasservorbehandlungsanlage der *LUPO Getränke AG*, Hochdorf fällt als Nebenprodukt Klärgas an, das in einem drucklosen Gasspeicher (150 m³) zwischengespeichert und danach in einem BHKW in Strom und Wärme umgewandelt wird. Der Strom des BHKW wird ins Netz eingespeist und die Abwärme wird verwendet, um das Abwasser im Zulauf zum Vergärungsreaktor zu erwärmen und damit seine Effizienz zu steigern. Zum Schutz des Gasmotors wird der Schwefelgehalt (H₂S) des Biogases in einer biologischen Entschwefelungsanlage reduziert. Der definitive Schlussbericht liegt nun vor.

Kompakt-Biogasanlage für die Landwirtschaft mit effizienter BHKW-Technik [25]: Nach erteilter Baubewilligung konnte die Detailplanung zielgerichtet angegangen werden. Es erfolgte eine Projektanpassung auf den Stand der Technik. Nebst SCR-Katalysator und Russfilter wurde das Konzept durch einen Nachgärer erweitert. Dadurch kann die restliche Abwärme des BHKW für eine höhere Gasproduktion eingesetzt werden. Die Aufträge für die Güllebehälter und die biogastechnischen Ausrüstungen wurden erteilt. Im November 2004 wurden erste Grabarbeiten für Gülleleitungen erstellt und im Januar 2005 werden die Behälter aufgestellt. Es ist vorgesehen, die Anlage im Mai 2005 in Betrieb zu nehmen.

Biogaz agricole Installation de production de biogaz a partir de fumier et autres cosubstrats [26]: L'année 2004 a été consacrée à finaliser les dossiers administratifs liés à la procédure de Plan partiel d'affectation (PPA) requise pour la réalisation de notre projet de codigestion de fumiers et autres cosubstrats solides. L'examen préalable du PPA au niveau cantonal a abouti par un avis général très favorable. La capacité de traitement envisagée reste fixée à 10'000 tonnes par an (fumier de bovins, de chèvres et de chevaux plus contenus de panses, déchets maraîchers, gazons, etc.).

Biogaz agricole : Amélioration de l'épandage du fumier digéré [27]: La mise en place d'une

unité de séparation de phases liquide-solide doit être systématiquement envisagée pour les installations de codigestion agricole incorporant des cosubstrats secs ayant, entre autres, pour effet d'augmenter la teneur en matière sèche de l'effluent digéré. L'expérience réalisée sur l'installation de M. Georges Martin à Puidoux a permis de mettre en évidence les points suivants :

- avec un séparateur à vis de marque FAN, donné pour un débit nominal de 3–8 m³/h pour un lisier à 10–12% MS, on a obtenu une fraction liquide présentant une teneur en matière sèche de l'ordre de 5 à 6% et une fraction solide de l'ordre de 26 à 27,5% MS.
- les difficultés de stockage (formation d'une croûte en surface) et d'épandage du digestat ont pu être réglées grâce à cet équipement.
- de nouvelles possibilités d'écoulement du digestat se sont ouvertes sous forme d'un produit pelletable et mûré par compostage, facile à mettre en oeuvre par les jardiniers amateurs comme par les professionnels.

Financièrement, l'installation d'un séparateur augmente de 12 à 20% le coût d'une installation de biogaz agricole de type compact.

Der Bau der **Kompakt-Biogasanlage Winzeler, Thayngen SH** [28] wurde im November 2004 abgeschlossen. Der Bau der Anlage dauerte genau ein Jahr – was unüblich lange ist – weil ein angrenzendes Gewerbegebäude und ein Fernwärmeheiznetz mit ausgebaut wurden. Die Anlage ging am 19. November 2004 in Betrieb und läuft seither störungsfrei. Während des ersten Betriebsjahres sollen nun sämtliche Eckdaten, welche zum Betrieb einer Biogasanlage gehören, erfasst werden. Es soll vor allem das Wärmemanagement beobachtet werden. Die Biogasanlage liefert mit rund 125 kW thermischer Leistung die Grundauslastung für ein Fernwärmeheiznetz, an dem der landwirtschaftliche Betrieb und ein Gewerbegebäude angehängt sind. Es soll 2005 auf ein weiteres Gewerbegebiet erweitert werden. Die Spitzenlast wird mit einer Holzschnitzelfeuerung abgedeckt. Die Kombination Biogas-BHKW und Holzfeuerung soll speziell untersucht werden, da dieses Modell für landwirtschaftliche Betriebe besonders geeignet scheint.

BHKW-Optimierung und SCR-Katalysator Kompaktbiogasanlage Küssnacht [29]: Damit weiterhin die hocheffizienten Zündstrahlmotoren zur Nutzung des Biogases auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen eingesetzt werden können, müssen die Abgase nachbehandelt werden, um die gesetzlichen Grenzwerte einhalten zu können. Die Stickoxidfracht schwankt wegen dem ständig

ändernden Methangehalt sehr stark. Es wurde ein Abgasreinigungskatalysator entwickelt, der mit diesen Anforderungen und den einzigartigen Rahmenbedingungen auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen umgehen kann. Die Katalysatorentwicklung wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Es gelang, einen standardisierten Katalysator auf SCR-Basis zu entwickeln, der alle Schwankungen im Abgas von BHKW in Biogasanlagen auszugleichen vermag. Die Werte der Luftreinhalteverordnung LRV werden mit dem neuen System problemlos eingehalten. Sollten sich in Zukunft die Abgasgrenzwerte weiter verschärfen, kann der Katalysator entsprechend ausgebaut werden.

Der Bau der **Kompakt-Biogasanlage Gansner, Graltshausen TG** [30] verlief problemlos und wurde im Juni 2004 abgeschlossen. Die Anlage ging im Juni 2004 in Betrieb und läuft seither störungsfrei. Während des ersten Betriebsjahres sollen nun sämtliche Eckdaten, welche zum Betrieb einer Biogasanlage gehören, erfasst werden. Es soll vor allem die nachgeschaltete Kompostiereinheit beobachtet werden. Damit kann mit der Abwärme des Motors der separierte Feststoffanteil nach dem Fermenter automatisch nachkompostiert werden.

Erhöhung des Gasertrags durch Co-Vergärung von protein- und fettreichen Stoffen

[31]: Mit dem Ziel, eine Möglichkeit zur besseren energetischen Nutzung des Biogaspotenzials auf einer ARA aufzuzeigen, fand von Frühjahr bis Herbst 2004 in Frick AG ein Versuch zur Co-Vergärung statt. Dabei wurde kommunalem Klärschlamm zur Vergärung ein Substrat aus verbrauchtem Frittieröl beigemischt und zur Umwandlung des entstehenden Biogases in elektrische Energie eine Mikrogasturbine verwendet. Durch gezielte Beprobung der Faultürme wurde insbesondere die Veränderung der Zusammensetzung des Klärschlammes und der Abbaugrad einzelner Stoffe, stellvertretend für den Fortschritt bzw. die Hemmung des anaeroben Abbaus, sowie die Prozessstabilität und die Reinigungsleistung der ARA bestimmt. Gasseitig wurden mittels spezieller Messelektronik die Mengen und die Qualität des Biogases und durch die direkte Weiterleitung in die Mikrogasturbine der Brennwert ermittelt. Grundsätzlich ist zu sagen, dass durch das Hinzufügen eines Co-Substrates eine wesentliche Erhöhung der Biogasproduktion möglich ist und man durch sehr geringe Änderungen an der Infrastruktur einer bestehenden Abwasserreini-

gungsanlage die Ausnutzung des Biogaspotenzials erheblich steigern kann.

Pilot-, Demonstrations- und Testanlage zur Erzeugung von Strom und Wärme aus pflanzlichen Ölen und tierischen Fetten in Mikroturbinen

[32]: Das Projekt soll aufzeigen, inwieweit pflanzliche Öle und/oder tierische Fette in Mikrogasturbinen in elektrische und thermische Energie umgesetzt werden können. Zu diesem Zweck wird eine Mikrogasturbine der Firma *Capstone* (USA) umgebaut. Bis heute wurden mit der Turbine verschiedene Versuche mit Dieselöl gefahren, um den Betrieb, das Handling und die Temperaturverläufe im Treibstoffsystem und der Turbine selber zu analysieren. Während eines einstündigen Testlaufs bei Vollast konnte zudem nachgewiesen werden, dass die Verbrennung von Pflanzenöl in der Mikrogasturbine vom thermodynamischen Prozess her kein grundsätzliches Problem darstellt. Ein willkommener Nebeneffekt konnte durch diesen ersten Praxistest bestätigt werden: durch die in der Turbine vorherrschenden Temperaturen werden Gerüche *verbrannt*. Die Herausforderung des Projektes liegt nun darin, den Brennstoff in der geforderten Viskosität, Temperatur und Reinheit in die Brennkammer zu bringen, so dass ein stabiler Dauerbetrieb möglich ist.

Biogaseinspeisung Engelhölzli [33]: Die *R.O.M. AG* in Frauenfeld betreibt den Kompostierplatz *Engelhölzli* (Gemeinde Jona/SG) und hat von den politischen Gemeinden Rüti, Jona und Rapperswil den Auftrag erhalten, auf diesem Kompostierplatz das Grüngut der drei Gemeinden nicht nur zu kompostieren, sondern auch energetisch zu nutzen. Sie will daher eine Kompogasanlage mit einer Jahreskapazität von 5'000 Tonnen bauen und betreiben. In unmittelbarer Nähe des Kompostierplatzes *Engelhölzli* verläuft die 5-bar-Transportleitung der Erdgas Zürich, die das Zürcher Oberland und den oberen Zürichsee mit Erdgas versorgt. Heute betreibt die *Kompogas AG* zwei Gasaufbereitungsanlagen (Samstagen und Bachenbülach). Im Gegensatz zu diesen beiden Aufbereitungsanlagen soll nun der Bau und Betrieb der Anlage in Engelhölzli direkt durch die *Erdgas Zürich* erfolgen. Die *R.O.M. AG* wird das anfallende Biogas der *Erdgas Zürich* verkaufen. Erstmals kommt ein neues Verfahren für die Aufbereitung des Biogases in Erdgasqualität zum Einsatz. Projektziel ist, die wirtschaftliche und technische Eignung des Verfahrens nachzuweisen.

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Verbrennung: Die Verbrennung ist nach wie vor die wichtigste Technik zur energetischen Nutzung von Holz und gleichzeitig die einzige mit bewährtem Stand der Technik und bedeutender Verbreitung. Die Feinstaub- und Stickoxidemissionen sowie die Kosten und Komfortansprüche der Betreiber sind die Hauptthemen zur weiteren Verbreitung der Nutzung von Energieholz. Im Berichtsjahr lag der Schwerpunkt auf Informationsanlässen und Ausbildungsseminaren, in denen der Stand der Technik und die laufenden Forschungsprojekten den Forschern, Planern der interessierten Bevölkerung vorgestellt wurde.

Vergasung: Um die Vergasersysteme zügig weiter zu entwickeln, müssten die nächsten Pilotanlagen realisiert werden können. Dies bedingt gute Standorte, Einsatz und Wille aller Beteiligten. Die Rahmenbedingungen könnten sich in der Schweiz auch für diese Technologie verbessern (siehe unten). Es wird weiter versucht, marktfähige Produkte zu entwickeln und Langzeiterfahrungen zu sammeln.

Vergärung: Das Interesse am Bau von landwirtschaftlichen Biogasanlagen hat im Berichtsjahr erneut stark zugenommen. Obwohl die Streichung der P+D-Mittel hemmend wirkt, konnten im Berichtsjahr einige Anlagen den Betrieb aufnehmen und daraus wertvolle Erfahrungen gesammelt werden. Weitere Anlagen sind in Planung. Die offenen raumplanerischen Fragen im Zusammenhang mit Biogasanlagen in der Landwirtschaft konnten mit den betroffenen Stellen im Berichtsjahr nicht vollständig geklärt werden. Der Bundesrat hat jedoch kürzlich entschieden, das Raumplanungsrecht zu ändern. Es sollen u.a. neue Bestimmungen für Bauten und Anlagen zur Erzeugung von Energie aus Biomasse in der Landwirtschaft eingefügt werden. Diese Änderungen sind wichtig, da die Erfahrung zeigt, dass landwirtschaftliche Biogasanlagen zurzeit nur wirtschaftlich betrieben werden können, wenn sie vollständig in den Landwirtschaftsbetrieb integriert sind und Co-Vergärung betreiben können. Mit Ausnahme von einigen gewerblich-industriellen Vergärungsanlagen, bei denen Biogas zu Erdgasqualität aufbereitet und als Treibstoff eingesetzt wird, werden heute vor allem BHKW zur Umwandlung von Biogas in Strom und Wärme eingesetzt. Insbesondere für landwirtschaftli-

che Betriebe ist die Verstromung von Biogas die einfachste und ökonomisch interessanteste Variante.

Das **Positionspapier** des BUWAL über die energetische **Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen** zeigt deutlich auf, dass die intensive Feld-Bewirtschaftung nicht befürwortet wird. Die energetische Nutzung von *Energiepflanzen* aus extensiv bewirtschafteten Flächen (Wiesen, ökologische Ausgleichsflächen, Stilllegungs- oder Randflächen etc.) wird jedoch begrüsst. Die im Rahmen eines Gemeinschaftsprojekts mit dem BUWAL und dem BLW lancierte Studie Ökobilanz von Energieprodukten [8b] soll zeigen, welche Prozessketten für die Bereitstellung von Energieprodukten aus Biomasse sinnvoll sind.

Im Zusammenhang mit der neuen **Biomasse-Potenzialstudie** [35] 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?

Allgemeiner Forschungsbedarf im Bereich Biomasse: Der Forschungsbedarf liegt vor allem in der Optimierung von Verfahren und Systemen, angefangen bei der Gewinnung des Einsatzmaterials (Feedstock), über die Aufbereitung und Umwandlung bis hin zur Nutzung oder Entsorgung bzw. Verwertung der Reststoffe. Die Forschung ist gefordert, einfache und effektive Lösungsansätze zu suchen, welche auch ein konkretes Umsetzungspotenzial aufweisen.

Als Folge der radikalen Budgetkürzungen im Bereich Pilot- und Demonstrationsanlagen werden vorerst keine Mittel mehr für die Förderung entsprechender Projekte zur Verfügung stehen. Die Realisierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen als wichtiger Zwischenschritt von der Forschung und Entwicklung in den Markt wird damit erschwert und das Forschungsprogramm *Biomasse* klar geschwächt. Damit trotzdem ein Technologietransfer stattfinden kann, muss dieser Sektor neu positioniert werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

(*) Bericht nicht publiziert

- [1] Th. Nussbaumer (thomas.nussbaumer@verenum.ch), VERENUM, Zürich: a) **Systemoptimierung automatischer Holzfeuerungen** (JB) ♦ b) **Wirkung von Verbrennungspartikel** (JB) ♦ c) **IEA, Bioenergy Agreement, Task 19 Biomass Combustion** (JB), (www.ieabcc.nl) ♦ d) **Low-Particle-Pelletfeuerung** (SB) ♦ e) **Low-Particle Unterschubholzfeuerung** (JB)
- [2] R. Bühler (rbbuehler@mus.ch), Maschwanden: **IEA, Bioenergy Agreement, Task 33, Thermal Gasification of Biomass** (JB), (<http://www0.gastechnology.org/pub/iea>).
- [3] Ch. Gaegauf (gaegauf@oekozentrum.ch), ÖKOZENTRUM, Langenbruck: **Bio-Pro** (JB), www.eu-projects.de.
- [4] Andreas Graber (a.graber@hsw.ch) HSW, Wädenswil: **Verfahren zur Aufbereitung von Abwasser aus der Holzvergasung zu Nutzwasser in Polykulturen** (JB).
- [5] H.R. Gabathuler (gabathuler.ag@bluewin.ch), Diessenhofen: **Regenkonzepte für bivalente Holzheizungsanlagen mit Speicher** (SB), www.qmholzheizwerke.ch.
- [6] Y. Membrez et al. (yves.membrez@erep.ch), EREP, Aclens: **Energie à partir du petit-lait: comparaison des filières biogaz et bioéthanol** (SB).
- [7] A. Wellinger (arthur.wellinger@novaenergie.ch), NOVA ENERGIE, Aadorf: **Vertretung der Schweiz im IEA Bioenergy Implementing Agreement, Task 37, Energy from Biogas and Landfill Gas** (JB), (www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37).
- [8] N. Jungbluth (jungbluth@esu-services.ch), ESU-services, Uster: ♦ a) **Vorstudie «Ökobilanz von Energieprodukten»** (SB) ♦ b) **Hauptstudie «Ökobilanz von Energieprodukten» (LCI Bioenergy)** (JB) ♦ c) **RENEW** (JB), www.renew-fuel.com.
- [10] E. Luye (enga@crystalvision-microsystems.com), BELAIR Biotechnologie, Lausanne: **Valorisation énergétique de matières organiques (VEMOT) - Avant projet** (SB)
- [11] Hersener/Meier (hersener@agrenum.ch), ARGE UF-Membran, c/o Ingenieurbüro HERSENER, Wiesendangen: **Vergärung von Gülle im Membran-Bioreaktor (MBR-Messkampagne)** (JB).
- [12] O. Fischli (energieprojekte@fischli.ch), energieprojekte fischli, Näfels: **Messkampagne für eine solare Klärschlamm-trocknungsanlage in Bilten GL** (SB).
- [13] P. van Trigt (vteconsult@tiscali.ch), VTE Consult, Baden: **Machbarkeitsstudie für die energetische Nutzung von gebrachten, unbehandelten, pflanzlichen Fetten aus der Gastronomie der Region St. Moritz** (SB).
- [14] Ch. Widmer (afag@datacomm.ch), AFAG Engineering, Binningen und Dr. A. Wellinger, Dr. G. Schober, Nova Energie GmbH, Aadorf: **Bau und Betrieb einer Perkolationsanlage zur Aufbereitung von Bioabfällen** (SB)
- [15] R. Buri, Beat Kobel (beat.kobel@rysering.ch), Ryser Ingenieure AG, Bern: **Teilstatistik Biogas – Erfassung Biogasdaten aus kommunalen ARA** (SB)
- [16] Th. Kupper (thomas.kupper@epfl.ch), EPFL, Lausanne: **Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz** (JB).
- [17] Dr. Jacques Fuchs (jacques.fuchs@fibl.ch), FiBL, Frick: **Auswirkungen von Komposten und Gärgut auf die Umwelt, Bodenfruchtbarkeit und Pflanzengesundheit** (JB).
- [18] U. Brücker (ub@itz.ch), ARGE SwissFarmerPower, Horw: **Swiss Farmer Power „Biogas vom Bauer wird zum Treibstoff von morgen“ (prix pegasus)** (JB).
- [19] Paul Scherrer Institut, Villigen: a) S. Biollaz (serge.biollaz@psi.ch), **Methan aus Holz** (JB) ♦ b) F. Vogel, **Biogenes Methan durch hydrothermale Vergasung**; (JB).

Liste der P+D-Projekte

- [20] R. Bühler (rbbuehler@mus.ch), Maschwanden: **Pilotanlage von rund 500 kW Leistung zum Verbrennen von landwirtschaftlicher Biomasse mit Holz** (JB).
- [21] J. Brenn EMPA, (jueg.brenn@empa.ch) Dübendorf: **Partikelabscheider für kleine Holzfeuerungen** www.minipap.ch (JB).
- [22] H. Gemperle (welcome@pyroforce.ch), Pyroforce, Emmenbrücke: **Forschungs- und Begleitprojekt an der Holzvergasungsanlage Pyroforce im AC-Zentrum Spiez** www.pyroforce.ch (JB).
- [23] 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).
- [24] F. Büchler, M. Gabriel (f.buechler@kuenzlerpartner.ch), Künzler + Partner AG, Luzern: **Lupo AG - Biogasverwertung mit BHKW** (SB).

- [25] Bruno Liesch (bruno.liesch@ines-energy.ch), INES Ingenieurbüro, Bern: **Kompakt-Biogasanlage für die Landwirtschaft mit effizienter BHKW-Technik** (JB).
- [26] R. Bettex (info@fromagerie-bettex.ch), Champpturoz: **Installation de production de biogaz** (JB).
- [27] D. Ruch (ruch@genesys-gmbh.ch), GENESYS GMBH, Frauenfeld: **Kompakt-Biogasanlage Ott, Kanton Schwyz - Zusammenfassung und Betriebsauswertung der Anlage** (JB).
- [28] D. Ruch (ruch@genesys-gmbh.ch), GENESYS GMBH, Frauenfeld: **Kompakt-Biogasanlage Winzeler, Thayngen SH** (JB).
- [29] D. Ruch (ruch@genesys-gmbh.ch), GENESYS GMBH, Frauenfeld: **BHKW-Optimierung und SCR-Katalysator Kompakt-biogasanlage Küssnacht** (JB).
- [30] D. Ruch (ruch@genesys-gmbh.ch), GENESYS GMBH, Frauenfeld: **Kompakt-Biogasanlage Gansner, Graltshausen TG** (JB).
- [31] B. Näf (beat.naef@verdesis.com), Verdesis Suisse S.A., Erlinsbach: **Erhöhung des Gasertrags durch Co-Vergärung von protein- und fettreichen Stoffen** (JB).
- [32] P. Keller (info@biodrive.ch), Biodrive AG, Lenzburg: **Pilot-, Demonstrations- und Testanlage zur Erzeugung von Strom und Wärme aus pflanzlichen Ölen und tierischen Fetten in Mikroturbinen** (JB).
- [33] J.-C. Weber (jeanclaude.weber@erdgaszuerich.ch), Erdgas Zürich AG, Zürich: **Biogasaufbereitungsanlage Engelhölzli** (JB).

Referenzen

- [34] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007**, ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, www.energie-schweiz.ch, Rubrik *Forschung: Konzepte*.
- [35] **Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz**, Infrac et al. 2004, www.ewg-bfe.ch, Rubrik *Publikationen*.
- [36] Th. Nussbaumer (verenum@access.ch), Verenum, Zürich: Grundlagen der Aerosolbildung, 2003 (SB).
- [37] Hersener/Meier (info@agrenum.ch), ARGE UF-Membran, c/o Ingenieurbüro HERSENER, Wiesendangen: **Membranevaluation zur Vergärung von Gülle im Membranreaktor** (UF-Membran), 2003 (SB).

KLEINWASSERKRAFTWERKE

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Manuel Buser

pl@smallhydro.ch



Ultra-Hochdruck-Trinkwasserkraftwerk Mettental

Pilotanlage mit einer rund 3000 m langen Druckleitung und einer Fallhöhe von 920 m, welche in einer Stufe genutzt wird

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Kleinwasserkraft ist eine der bedeutendsten erneuerbaren Energietechnologien in der Schweiz und ihre Rolle wird häufig unterschätzt. Dabei produzieren hierzulande über 1000 Anlagen jährlich rund 3400 GWh wertvolle Elektrizität aus einheimischen Ressourcen.

Die Kleinwasserkraft-Szene in der Schweiz ist in Bewegung. Nach dem Boom der 90er-Jahre bestätigt sich bei den Fliessgewässern der Trend zur Reaktivierung alter Anlagen sowie zum Bau von Dotierkraftwerken. Die Nutzung der potenziellen Energie in Trinkwassersystemen etabliert sich zusehends und wird zur ökonomischen und ökologischen Selbstverständlichkeit. In der letzten Zeit sind auch vermehrt Projekte für den Neubau von Anlagen an bisher ungenutzten Standorten gestartet worden. Dabei wäre es allerdings verfrüht, von einem Trend zu sprechen.

Umfeld

Die rasante Entwicklung der Ökostrommärkte hat viel zum Aufschwung der Kleinwasserkraft beigetragen. Im Gegensatz zu früher haben Kleinwasserkraftwerke strenge ökologische Auflagen zu erfüllen. Dies führt zu einem Innovationsbedarf und zu einer grösseren Nachfrage nach verträglichen Lösungen für den Wasserbau, die Fischdurchgängigkeit, die Rechen und die Turbinen. Die berechtigten Anliegen der Gewässerökologie führen aber auch zu finanziellen und energetischen Einbussen bis hin zu Stilllegungen.

Verschiebung der Prioritäten

Der Bereich *Kleinwasserkraftwerke*, welcher bis anhin P+D- und EnergieSchweiz-Projekte umfasste, hat im Jahr 2004 eine erste Phase des Wandels erfolgreich abgeschlossen. Die Trägerschaft wurde erneuert und das Netzwerk wird ab 2005 in ein Kompetenzzentrum unter der Leitung der St. Galler Kleinwasserkraft-Firma *entec ag* überführt.

Mehr Gewicht bei den Massnahmen von wird künftig die Marktbearbeitung erhalten: Kommunikation und Einbezug weiterer Partner seien als Stichworte genannt. Die quantifizierten Ziele der Marktbearbeitung setzten u.a. auf das erfolgreiche Instrument der Vorstudien. Die Berichte der Vorstudien, welche für das Jahr 2003 im vorliegenden Bericht veröffentlicht wurden, sind neu im Jahresbericht von EnergieSchweiz zu finden [11].

Der Bereich erfuhr im Jahr 2004 Budgetkürzungen im Umfang von 20% und gleichzeitig eine Umwandlung der P+D-Mittel in Forschungsgelder. Die Verschiebung der Mittel führt dazu, dass

Innovation und Forschung ein höheres Gewicht erhalten. Die Förderung von neuen P+D-Projekten ohne besonderen Innovationscharakter war im Jahr 2004 nicht möglich. Dafür konnte eine beschränkte Anzahl Projekte mit Forschungscharakter unterstützt werden. Vermehrt ist der Bereich auf den subsidiären Einsatz kantonaler oder privater Fördermittel angewiesen, damit das gemeinsame Ziel – die höchstmögliche Nutzung des Kleinwasserkraft-Potenzials – nicht gefährdet wird [10]. Denn nach wie vor weist ein beträchtlicher Teil der Anlagen Kosten auf, die mit dem gesetzlichen Rücklieferarif nicht gedeckt werden können.

Langfristige Ziele

Das langfristige und übergeordnete Ziel des Bereichs unterscheidet zwischen Nebennutzungen wie Trink-, Abwasser- und Dotierkraftwerken sowie Hauptnutzungen (s. Fig. 1):

- Nebennutzungen: *Vollständige* Erschliessung des Potenzials
- Hauptnutzungen: Erhalt und Ausbau unter der Bedingung einer ökologisch einwandfreien Qualität der Fliessgewässer

Das neue Forschungsprogramm 2004-2007

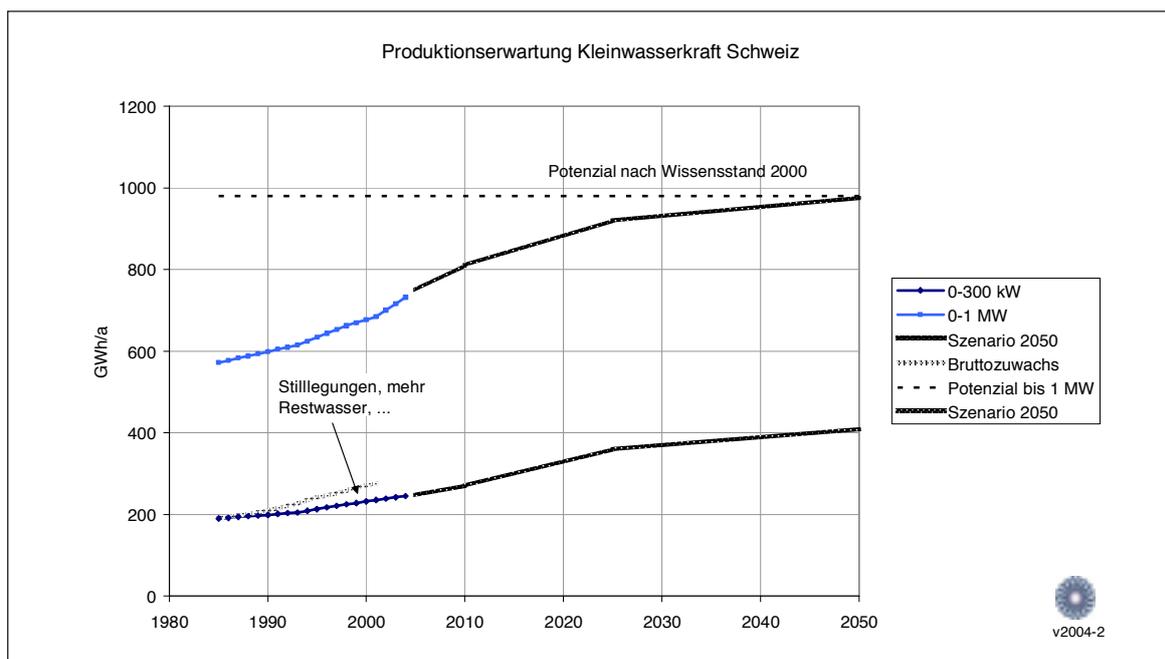
Für die Kleinwasserkraft wurde im Berichtsjahr ein umfassendes vierjähriges Forschungskonzept ausgearbeitet [12]. Es zeigt zwölf mögliche Forschungsgebiete auf und legt Prioritäten in Abhängigkeit der verfügbaren Mittel fest. Das Programm wurde von der CORE verabschiedet.

Oberziel der Forschung ist die Förderung von Innovation und Know-how im Schweizer Kleinwasserkraft-Sektor. 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

Die Stärke des Forschungsprogramms liegt in seiner Koordinationsfunktion. Es bietet eine einzigartige gesamtschweizerische Plattform für private und öffentliche Betreiber, Investoren, KMUs (rund 50), die Elektrizitätswirtschaft, die Hochschulen, den Bund, die Kantone und die Verbände.



Figur 1: Wachstum der Grössenklassen bis 300 kW und bis 1 MW seit 1985, und mögliches Zukunftsszenario

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

Das Projekt **Charakteristiken von Pumpen im Turbinenbetrieb** [1] befindet sich in der Ausführungsphase. Es wird in Zusammenarbeit mit *Sulzer Pumps* abgewickelt. Ein bestehender Prüfstand wurde angepasst und mit verbesserter Messtechnik sowie mit einem neuen Antrieb (variable Drehzahl) ausgerüstet. Die eigentlichen Forschungsarbeiten wurden aber nicht begonnen wegen noch fehlender Kofinanzierung.

Ein weiteres Projekt zur Thematik *Pumpen als Turbinen* ist angelaufen, mit dem Ziel, diese Technik bekannter und beliebter zu machen. Es geht darum, die Technik der **Standardpumpen für klei-**

ne Leistungen [2] an einer mehrstufigen Hochdruck-Anlage durch eine Messkampagne zu validieren. Das Projekt wird in Zusammenarbeit mit der Pumpenherstellerin *Häny AG* durchgeführt und soll 2005 abgeschlossen werden.

Die letzte Untersuchung zum messbaren Produktionszuwachs im Bereich 0-300 kW liegt schon einige Jahre zurück. Um die jüngsten Trends besser quantifizieren zu können, wurde die **Ermittlung des Brutto-Zuwachses** [4] kleinster Wasserkraftwerke bei der *ITECO Ingenieurunternehmung AG* in Auftrag gegeben. Definitive Ergebnisse werden im Jahr 2005 veröffentlicht.

Nationale Zusammenarbeit

Die Kleinwasserkraft beschränkt sich nicht auf hydraulische Maschinen, sondern ist vielmehr ein interdisziplinäres Gebiet, welches sich von Wasserbau, Mechanik, Elektrotechnik bis zu Geografie, Hydrologie und Umweltwissenschaften erstreckt. Die Schweizer Kleinwasserkraft-Szene ist ausserdem relativ heterogen. So agieren zum Beispiel mehrere Verbände und gut 50 KMUs mit unterschiedlichsten Spezialisierungen im Markt. Entsprechend wichtig ist eine gute Vernetzung.

Im Bereich Forschung / P+D fand für die Ausarbeitung des Forschungsprogramms 2004-2007 eine Konsultation bei verschiedenen Partnern statt. Diverse Feedbacks sind daraufhin in das Programm eingeflossen, so dass nun ein breit abgestütztes Programm vorliegt.

Positiv zu werten ist ferner die Beteiligung des BUWAL und des BBW an Forschungs- beziehungsweise P+D-Projekten zum Thema Kleinwasserkraft.

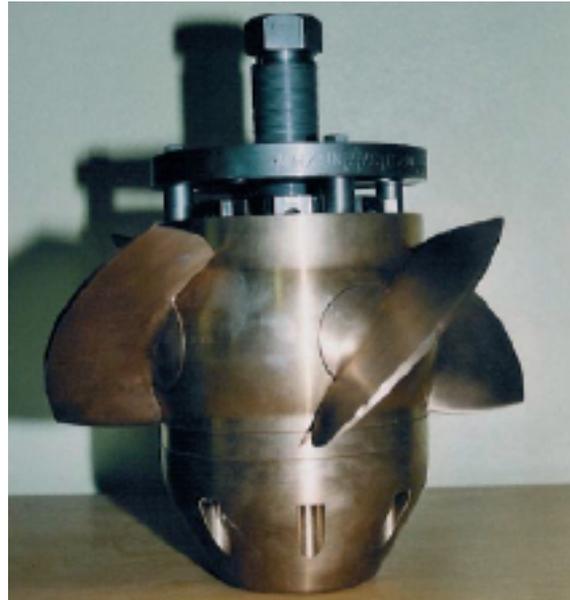
Internationale Zusammenarbeit

Die Akteure des Programms Kleinwasserkraftwerke sind gut in das europäische Umfeld integriert. So sind beispielsweise mit der EPFL und dem MHyLab gleich zwei Schweizer Organisationen im **Thematic Network on Small Hydropower (TNSHP)** der ESHA (European Small Hydropower Association) vertreten.

Die europäische Kommission finanziert im Rahmen des Programms **ALTENER** das Projekt **SPLASH – Spatial Plans and Local Arrangements for Small Hydro** zur Ermittlung potenzieller Standorte für Kleinwasserkraftwerke. Der Schweizer Beitrag besteht hierbei in der Beurteilung des mittel- und längerfristigen Potenzials der neuen Technologien in Bezug auf die Machbarkeit von Kleinwasserkraftanlagen an bestimmten Standorten, welche bisher als technisch unattraktiv galten. Das BFE unterstützt klar definierte Teilaspekte dieses Projekts. Dabei geht es darum, bestehendes Know How aus den DIANE- und PACER-Programmen aufzuarbeiten, zu aktualisieren und gezielt zu verbreiten. Die Umsetzung erfolgt durch die Firma *entec ag*.

Das Projekt **SEARCH LHT** [3] des *MHyLab*, wurde vom BFE bis 2002 unterstützt läuft seither als europäisches Forschungsprojekt ohne BFE-Beteiligung weiter. Das Projekt verfolgt das Ziel, eine komplette Palette neuer Niederdruckturbinen (4-

bis 8flügelig) zu entwickeln (s. Fig. 2). Für die letzte Phase wurden im Sommer 2004 Mittel vom BBW bewilligt. Somit bestehen interessante Aussichten für Innovationen im Niederdruck-Bereich. Es bleibt zu hoffen, dieser KMU-basierte Ansatz viele Früchte trägt.



Figur 2: Vierflügelige Niederdruckturbine (Foto: MHyLab)

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Trinkwasserkraftwerk Mettental [6] (s. Fig. 3 und Titelbild): Im Rahmen dieses Projekts wird ein Ultra-Hochdruck-Trinkwasserkraftwerk realisiert, welches das Trinkwasser einstufig über eine Fallhöhe von 921m turbiniert.

Mit einer Ausbauleistung von 218 kW wird eine Jahres-Energieproduktion von rund 830'000 kWh erwartet. Die Bauarbeiten sind grösstenteils abgeschlossen und die Anlage soll Anfang 2005 in Betrieb genommen werden.

Das Projekt stellt hinsichtlich Nutzung der gesamten Fallhöhe in einer Stufe ein Novum dar. Eine technische Herausforderung liegt im extrem dünnen Düsenstrahl bei Teillast, welcher das Synchronisieren erschweren und den Wirkungsgrad verschlechtern kann. Ebenfalls anspruchsvoll ist der Bau von Hochdruck-Rohrleitungen im steilen Berggelände. Beim Projekt Mettental kamen

Steckmuffenrohre mit innen- und aussenliegender Zementmörtelbeschichtung zum Einsatz. Die Muffen verfügen über eine spezielle Dichtung und lassen sich ohne spezielle Formstücke relativ stark auslenken, was die Verlegung vereinfacht.



Figur 3: Trinkwasserkraftwerk Mettental (Foto: ITECO)

Drucktests bestätigten bereits die gute Dichtheit der Leitung.

Eine einstufige Lösung solcher Kleinwasserkraftwerke hat auf dem Markt gute Chancen, da die Wirtschaftlichkeit infolge Einsparungen bei den Erschliessungskosten erhöht wird.

In geschlossenen Rohrleitungssystemen muss häufig ein unzulässig hoher Druck auf den notwendigen Versorgungsdruck reduziert werden. Die Druckreduzierenergie wird dabei meist in nicht nutzbare Wärme umgewandelt. Mit entsprechenden Kraftwerksanlagen im Kleinformat könnte der grösste Teil dieser Energie dem elektrischen Netz zugeführt werden. Die Probleme liegen dabei im Restdruck nach der Turbinierung, der für die Versorgung der Zone gewährleistet sein muss und in den Druckstössen, welche durch die stark schwankenden Wasserbezüge verursacht werden.

Im Projekt **Kleinstwasserkraftwerke für variable Volumenströme in geschlossenen Systemen** [7] soll eine kostengünstige Anlage zur Nutzung der Druckreduzierenergie in geschlossenen Systemen (meist Trinkwasserversorgungen) entwickelt werden (s. Fig. 4). Das Anwendungspotenzial ist beträchtlich und die Gesamtkobalanz von solchen Systemen hervorragend.

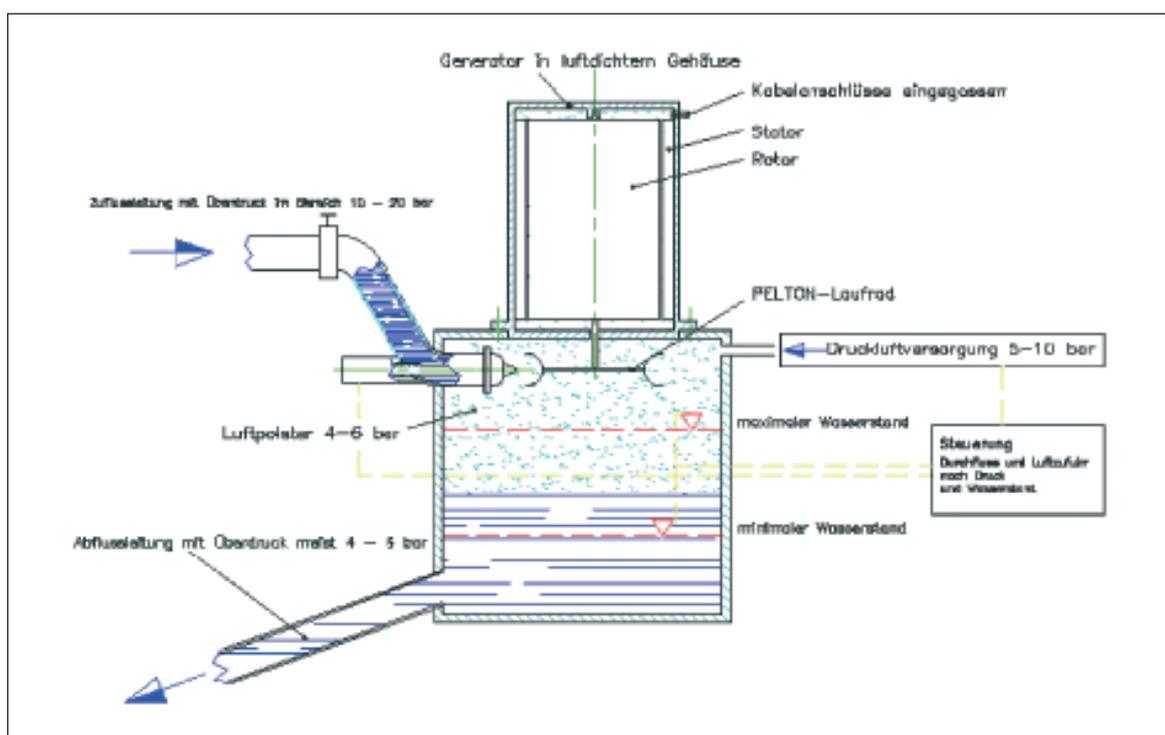
Im Rahmen des Projekts, das von der *Stiftung Revita* durchgeführt wird, wurden umfangreiche

Berechnungen, Simulationen und Vorabklärungen durchgeführt. Es wird nun die Realisierung eines Prototyps an einem noch zu bestimmenden Standort angestrebt.

Das Kraftwerk **Buchholz** [8] in Gossau / Flawil (SG) befindet sich in der Bauphase. Dieses Projekt beinhaltet die Sanierung und Verstärkung der baufälligen Staumauer und den Neubau eines Kleinwasserkraftwerks mit 140 kW Leistung bei gleichzeitigem Erhalt des Auengebietes Eberleweiher, einem Schutzgebiet von nationaler Bedeutung. Ende 2004 war knapp die Hälfte der Vorbetonierung vollendet. Verschiedene Medienberichte in Presse, Radio und Fernsehen zeugen von einem grossen Interesse am Projekt.

Innovativen Charakter hat das Kraftwerk an der Glatt durch den Bau einer neuartigen Fischaufstiegshilfe (Fischschleuse), mit der die Fischdurchgängigkeit der über 15 m hohen Staumauer erreicht wird. Ausserdem handelt es sich um eine Anlage, die in hervorragender Weise die Synergien zwischen Kleinwasserkraftnutzung und den Anliegen des Gewässer- und Umweltschutzes aufzeigt.

Bei der Wiederinbetriebnahme stillgelegter Kleinwasserkraftwerke sind nicht nur strenge Umweltauflagen zu erfüllen, bisweilen stellen sich durch den Denkmalschutz auch besondere konstruktive Anforderungen an die Maschinen. Mit



Figur 4: Luftgepolsterte Pelton-turbine für den Einsatz in einem geschlossenen System (Skizze: Revita)

dem Projekt zur Entwicklung eines **zweiteiligen Synchrongenerators mit Permanentmagneten** [9] soll eine Lösung aufgezeigt werden, bei welcher der Generator direkt an die Turbinenwelle angebaut wird. Im Vordergrund stehen die Steigerung des Gesamtwirkungsgrades, die Reduktion der Unterhaltskosten sowie das Schonen historisch wertvoller Anlageteile.

Leider mussten aufgrund massiver Budgetkürzungen auch zahlreiche Gesuche abgelehnt werden. Zu den wegen Geldmangels abgelehnten Projekten gehören:

- Tunnelwasser-KW Flimsenstein: Zweistufige Anlage, Gesamtleistung gut 1 MW.
- KW St. Albenteich: Nachdem das BFE das Gesuch der *Stiftung Revita* ablehnen musste, konnte das BUWAL einspringen. Dabei steht der Umwelt- / Heimatschutz im Vordergrund.
- Centrale de la Chocolatière: Anlage von 120 kW als Bestandteil eines Umnutzungsprojektes in Bussigny
- Projekt Sous-les-Roches: Neubau eines Kraftwerks in Sonceboz
- Insgesamt fünf spontan eingetroffene Gesuche für Vorstudien

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Forschung

Mit dem Forschungsprogramm 2004-2007 liegt ein kohärentes Konzept für die nähere Zukunft vor. Ob mit den vorhandenen Mitteln genügend relevante Projekte initiiert und unterstützt werden können, wird sich aber erst noch weisen müssen.

Pilot- und Demonstrations-Projekte

Die Studien der beiden letzten Jahre haben aufgezeigt, dass nach wie vor ein grosses Potenzial an

vielen wirtschaftlich interessanten Standorten genutzt werden könnte. Es besteht demgegenüber ein gewisser Handlungsbedarf bei den Reaktivierungen, so z.B. bei etlichen Kraftwerken, die zu Industrieanlagen mit beträchtlichem Eigenbedarf gehören. Solche Anlagen stehen teilweise still, weil sie nicht in den Genuss der üblichen Rückliefertarife gelangen, sondern lediglich intern den billigen Industriestrom mit teurerem Ökostrom substituieren würden.

Liste der Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

- [1] Michel Dubas, michel.dubas@hevs.ch, Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale (HES SO), *Sion: Charakteristiken von Pumpen im Turbinenbetrieb* (JB).
- [2] Ernst A. Mueller, mueller.eam@bluewin.ch, Zürich: *Standardpumpen für kleine Leistung, Messprogramm* (JB)
- [3] Vincent Denis, vincent.denis@mhyllab.com, MHyLab, laboratoire de mini-hydraulique de *Montcherand: SEARCH LHT, développement de turbines basse chute*, rapport complémentaire, période du 1^{er} juin 2000 au 31 mai 2004, projet OFES 00.0373-1
- [4] Hanspeter Leutwiler, hpleutwiler@iteco.ch, ITECO Ingenieurunternehmung AG, *Affoltern am Albis: Brutto-Zuwachs für anonymisierte Statistiken* (JB) (SB: -)
- [5] Martin Roth, martin.roth@entec.ch, entec ag, *St. Gallen: SPLASH – Spatial Plans and Local Arrangements for Small Hydro*, Schweizer Beitrag zum EU-Forschungsprojekt (JB).
- [6] Alois Spichtig, alois.spichtig@bluemail.ch, Wasserversorgung *Sachseln* Dorf und Umkreis (WVS): *Trinkwasserkraftwerk Mettental*.
- [7] Bruno Schindelholz, bruno.schindelholz@revita.ch, Stiftung Revita, *Langenbruck: Kleinstwasserkraftwerke für variable Volumenströme in geschlossenen Systemen*.
- [8] Peter Eichenberger, peter.eichenberger@entec.ch, ENTEGRA Wasserkraft AG, *St. Gallen: Kleinwasserkraftanlage Buchholz* (JB 2003).
- [9] Bruno Schindelholz, bruno.schindelholz@revita.ch, Stiftung Revita, *Langenbruck: Zweiteiliger Synchrongenerator mit Permanentmagneten*.

Referenzen

- [10] *Positionspapier Energie aus Kleinwasserkraftwerken: Ziele und Prioritäten für die Nutzung von Energie aus Kleinwasserkraftwerken*, BFE, Version 1.2, Dezember 2004.
- [11] *4. Jahresbericht EnergieSchweiz 2004/05*, UVEK, Programmleitung EnergieSchweiz, BFE (Herausgeber), erscheint im September 2005, Vertrieb bei BBL Verkauf Publikationen 3003 Bern, Download: <http://www.energie-schweiz.ch/inter-net/03560/index.html?lang=de>.
- [12] Manuel Buser, Hedi Feibe, entec ag, *St. Gallen, Forschungsprogramm Kleinwasserkraftwerke 2004-2007*.

GEOHERMIE

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Harald L. Gorhan

harald.gorhan@bluewin.ch



Le musée des confluences in Lyon: Kristallwolke des Wissens (Architekt CoopHimmelblau)

Aufgrund des schlecht tragfähigen Baugrundes wurde dieses Museum auf Energie-Pfählen errichtet, die dem Untergrund Heizwärme und Kälte zur Gebäudeklimatisierung entziehen. Zur optimalen Auslegung lieferten Schweizer Fachleute die dafür nötigen Expertisen.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Forschungsschwerpunkte

Seit 1997 wurden vom BFE ca. 3.7 Mio. Franken an Forschungsgeldern für die beiden Deep-Heat-Mining (DHM) Projekte in Basel und Genf aufgewendet, wodurch bis heute mehr als 35 Mio. Franken an Drittmitteln (in erster Linie von den Kantonen BS und BL) ausgelöst wurden. Damit sollte der Realisierung der ersten geothermischen Tiefbohrung in Basel im Jahr 2005, bis in eine Tiefe von ca. 5 km, nichts mehr im Wege stehen. Basierend auf Vorstudien soll nun die Forschung verstärkt

- auf Energieumwandlungsprozesse zur Nutzung von geothermischer Wärme zur Stromproduktion (ORC, Kalina, Hybrid, etc.),
- auf geothermische Potentialstudien zur Planung von optimalen Anlage-Standorten in der Schweiz,
- beziehungsweise auf die Verbesserung von Bohrtechnologien für geothermische Anwendungen gelegt werden.

Ziel ist, bis 2008 / 2009 die erste DHM-Anlage in der Schweiz zur kombinierten Strom- und Wärmeproduktion in Betrieb zu nehmen.

Bezüglich untiefer Geothermie soll 2005 die Forschung auf den folgenden Gebieten vorangetrieben werden:

- Erhöhung der generellen Planungssicherheit mittels innovativen Qualitätssicherungs-Tools
- Klimatisierung von geothermischen Grossanlagen mittels *Geocooling*

- technisch-wirtschaftliche Verbesserungen von Sonden-Aussenisierungen zur Überbrückung der *neutralen Zone*
- Erarbeitung von benutzerfreundlichen Auslege-Tools für die Grundwasser-Wärmenutzung
- Zusammenstellung von bisherigen Erfahrungen mit so genannten Erdwärmekörben inklusive Erstellung eines diesbezüglichen Manuals.

Ziele der Pilot- und Demonstrationsanlagen

- Abschluss aller laufenden Erfolgskontrollen (zweijährige Messkonzepte) von geothermischen Grossanlagen bis Ende 2005
- Einzig weiterverfolgt werden die bereits angelaufenen Feldversuche für eine mögliche Energierückgewinnung mittels Bohrloch-turbine, bei der Wärmenutzung von tiefer gelegenen Aquiferen
- Datenzusammenstellung von Bau- und Betriebserfahrungen ausgewählter P+D Vorzeigeprojekte für Publikationen, Informationsblätter und Prospekte, zwecks einer effizienten Verbreitung von geothermischen Grossanlagen
- Abschluss der Abreiten an detaillierten, technisch-wirtschaftlichen Machbarkeits- und Abnehmerstudien für die Nutzung von Tunnelwasser-Wärme an allen 4 Portalzonen der beiden AlpTransit Tunnelröhren

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

DEEP HEAT MINING

Energieumwandlungsprozesse für die Nutzung geothermischer Energie [1]: Die bisherigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der tiefen Geothermie konzentrierten sich primär auf die Ressource und deren Erschliessung. Fragen der Umwandlung und Nutzung der gewonnenen geothermischen Wärme wurden in geringerem Umfang behandelt. Die Arbeiten in Zusammenhang mit den Schweizer EGS-Aktivitäten (*Enhanced Geothermal Systems*) haben jedoch gezeigt, dass zur Optimierung einer Anlage die gegenseitige Abstimmung von Ressource und Energieumwandlungsanlage von grosser Bedeutung ist. Das Projekt verfolgt folgende Hauptziele:

- Übersicht über die verschiedenen Umwandlungsprozesse
- vertiefte Behandlung kurz- und mittelfristig einsetzbarer Technologien mit besonderem Interesse für Projekte in der Schweiz
- Koordination und Informationsaustausch im In- und Ausland und
- Identifikation wichtiger F+E-Bedürfnisse.

Deep Heat Mining; Entwicklung der Hot-Dry-Rock/Hot-Wet-Rock-Technologie in der Schweiz; 2003. Investigations relatives à l'implantation d'une centrale DHM à Genève [2]: Les études énergétiques ont prouvé que le réseau CAD des SIG est capable d'absorber

l'énergie thermique produite par la centrale GGP. Le pilotage du projet a été assuré par les SIG, en collaboration avec ScanE. Une structure organisationnelle du projet a été prévue pour la prochaine phase, qui facilitera le passage ultérieur à la création d'une société ad hoc. Des contacts sont en cours auprès de partenaires pour trouver le financement, qui lors des phases exploratoires devrait être assuré par les pouvoirs publics.

Teilnahme am *European geothermal project for the construction of a scientific pilot plant based on Enhanced Geothermal Systems* [3]:

The spatial development of the micro-seismic locations as well as the pressure response in the injection well itself has been well fitted with a new fractured reservoir model HEX-S. The same reservoir model succeeded to predict the near-borehole development of the micro-seismicity during the initial phase of the stimulation tests. Geochemical simulation with the code FRACHEM will help to forecast the behaviour of the Soultz fractured reservoir during long-term fluid production-injection processes. On-going work of the Engineering Geology Group at the ETHZ, in collaboration with the BRGM, concerns the identification and analysis of natural fractures on the sonic televiewer (UBI) logs. The group is also analysing breakouts and drilling-induced tension fractures, observable in wells and on UBI logs, to carry out stress estimates. In close cooperation with specialist of the Technical University of Graz, petrophysical properties (e.g. Biot's constant) of altered and unaltered granite from Soultz, will be determined.

***Geothermische Ressourcen. Erarbeitung und Bewirtschaftung des geothermischen Potentials der Schweiz* [5]:**

Zur individuellen Bewertung der geothermischen Ergiebigkeit des Untergrundes im Schweizer Mittelland werden geologische, geothermische und hydrogeologische 3D-Datenanalysen durchgeführt. Es zeigt sich, dass in einem Quader mit 1 km Kantenlänge in 5 km Tiefe die maximal vorrätige Wärmeenergie (heat in place) nicht stark variiert (270 – 440 PJ). Hingegen hängt die effektiv nutzbare Energie von den hydraulischen Eigenschaften der Gesteine ab. Die Prognosen für die Nordschweiz zeigen, dass aus dem Kristallin unterhalb des Permokarbon-Troges, bei oben genanntem Reservoirvolumen, über 30 Jahre total mehr als 70 PJ gefördert werden kann; im Kristallin südlich davon sind es jedoch weniger als 10 PJ. Durch Kombination mit Oberflächendaten (Besiedlung, Oberflächengewässer, etc.) kann eine optimale Nutzung für den Raum Baden-Brugg bestimmt werden (max. 71 PJ). Für zukünftige EGS-Nutzungen hier sind allerdings grössere Bohrtiefen erforderlich.

ERDWÄRMESONDEN UND ENERGIEPFÄHLE, QUALITÄTSKONTROLLE

***Manuel GEOCOOLING* [6]:** Le but de ce projet était de synthétiser les connaissances en matière de géocooling et de les rendre disponibles aux professionnels. De nombreuses informations ont été récoltées (systèmes pilotes, programmes de simulation dynamique détaillée, règles du pouce), ce qui a permis de faire le point sur les connaissances actuelles et de les présenter de manière cohérente, unifiée et efficace pour les praticiens, tout en mettant en lumière les lacunes subsistantes. Un ensemble de fiches synthétiques d'exemples accompagne le travail.

***Geostructures énergétiques – manuel pour la planification, la construction et l'exploitation (MGE)* [7]:**

Die primäre Aufgabe von Geostrukturen, wie z.B. Gründungspfähle und Stützwände, ist die Sicherstellung der Stabilität von Bauwerken. Das Manual zeigt auf, wie diese Geostrukturen zusätzlich zur Wärme- und Kälteproduktion genutzt werden können. Des Weiteren wird für Entscheidungsträger, Bauherrn und Planer ein Leitfaden für die Planung und Ausführung präsentiert. Dieses Manual ergänzt bereits bestehende SIA Dokumente (SIA DO 0179 [26], SIA D028 [27] und D0136 [28]).

***Kompilation, Auswertung und Erfolgskontrolle von Messkampagnen an Erdwärmesonden-Energiepfahlsystemen sowie Grundwassernutzungen inklusive Wirtschaftlichkeitsanalysen* [8]:**

In den letzten Jahren wurden im Auftrag des BFE in verschiedenen Kantonen zahlreiche Messkampagnen an Erdwärmesonden (EWS)- und Energiepfahlanlagen durchgeführt. Davon wurden 5 Anlagen sowohl auf Konsistenz der Messkampagnen als auch auf Wirtschaftlichkeit näher geprüft, mit dem Ziel, zukünftige Kontrollmessungen zu vereinheitlichen.

***Gütesiegel «geothermische Quelle» (Qualitätssicherungssystem)* [9]:**

Eine häufig bemängelte Tatsache ist, dass in der Schweiz weder ein verbindlicher Stand der Technik für Planung und Auslegung von geothermischen Grossanlagen vorhanden ist, noch die Verantwortlichkeiten im Schadensfall klar geregelt sind. Unter Mitarbeit aller direkt Beteiligten werden die Grundlagen für die Schaffung einer diesbezüglichen schlanken SIA-Norm, analog zu anderen SIA-Normen neueren Datums zusammengetragen.

***Erdwärmesonden (EWS) für Direktheizung. Phase 1: Modellbildung und Simulation* [10]:**

Im Molassegebiet des schweizerischen Mittellandes ist in Tiefen von ca. 400 m mit Temperaturen von 24-26°C zu rechnen. Dies ist die minima-

le Temperatur, mit der heute ein gut wärmege-
dämmtes Gebäude mit Strukturheizung direkt,
also ohne Wärmepumpe, auf 20°C beheizt wer-
den könnte. Mit einer Kosten-Nutzenanalyse soll
nun die Wirtschaftlichkeit von tiefen EWS in Ab-
hängigkeit des Strompreises und möglichen wei-
teren Preisentwicklungen bei Bohrkosten unter-
sucht werden.

**Arteserkarte der Schweiz, Teilgebiet Basel
– Luzern** [11]: Im Hinblick auf EWS-Bohrungen
wird das Gefährdungspotential durch artesisches
Grundwasser kartografiert. Dies als Entschei-
dungshilfe und Planungsgrundlage für die Behör-
de, Bauherrn, Planer und Bohrunternehmen. Des
Weiteren konnte ein Leitfaden über den fachge-
rechten Umgang mit Artesern erarbeitet werden.

**Optimierung von Sondenisolationen im
obersten Abschnitt von Erdwärmesonden**
[12]: An drei Geothermieprojekten in Otelfin-
gen, Seengen und Aarau wird der technisch-
wirtschaftliche Nutzen einer EWS-Isolierung der
obersten Sondenmeter (durch Temperatur-Jahres-
gang beeinflusster Untergrund) näher untersucht.
Die Ergebnisse zeigen auf, dass eine Isolation dort
notwendig wird, wo die Sonden relativ tief in die
Erdschichten eingebunden sind und/oder die Vor-
lauftemperaturen während des grössten Teils des
Jahres hoch bleiben. Aufgrund gemachter Erfah-
rungen wurde nun von der Industrie ein spezielles
Isolationsrohr für EWS entwickelt.

**Automatisation et télétransmission des don-
nées pour les tests de réponse** [13]: Le mo-
dule de chauffage de l'EPFL, réalisé en 1998 pour
étudier le comportement thermomécanique d'un
pieu énergétique ou de sondes géothermiques, a
été modernisé. Avec les progrès récents des té-
lécommunications, il est apparu qu'il serait très
profitable de rendre cet appareil plus performant.
Les mesures effectuées sur place peuvent dès lors
être disponibles en temps réel sur l'Internet. De
plus toute panne de courant est immédiatement
signalée par SMS, ce qui permet de remédier très
rapidement à un problème d'électricité. Un pre-
mier test de réponse avec la nouvelle configura-
tion a été réalisé à Lyon début 2004 (musée des
confluences, voir page titre).

WÄRMENUTZUNG VON TIEFEN AQUIFEREN (THERMALWASSER)

**Etude de la valorisation des rejets thermi-
ques des Bains de Lavey** [14]: L'analyse fine des
installations, avec recoupement entre modèle de
consommation et bilans mensuels mesurés, dé-
montre que le niveau de température du rejet ain-
si que son débit sont directement dépendants des
surverses des piscines. Cette eau à 36°C parvient
dans les bassins tampons, puis dans le bassin de
retenue. Concernant les projets externes de valo-
risation du rejet, on constate qu'il y a beaucoup
de variantes possibles.

Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr wurde mit den folgenden Schwei-
zer Institutionen eng zusammengearbeitet:

- **Universitäten und Fachhochschulen:** ETHZ (Institut für Geophysik, Institut für Energietechnik, FG Hochspannungstechnologie), Hochschule Wädenswil, Centre d'hydrogéologie de l' Université de Neuchâtel, Département de génie civil, Institut des sols, roches et fondations de l' EPFL, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie de l'Université de Genève, Instituto di scienze della terra e laboratorio di energia, ecologia ed economia della scuola universitaria della Svizzera italiana, Haute école valaisanne und Fachhochschule Burgdorf;
- **Stromindustrie:** Siemens Schweiz AG, BKW, ATEL, Elektra Baselland, Industrielle Werke Basel Aarau Lausanne Freiburg und Genf.
- **Bundesämter, Agenturen und Fachverbände:** Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz (AEE, APES), BUWAL, BBW, BWG, Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS), sowie Energiesysteme/Haustechnik, und der Fachgruppe Geothermie der Energietechnischen Gesellschaft (GTA) von ElectroSuisse.
- **Energiefachstellen:** Zusammenarbeit mit allen Energiefachstellen in der Romandie und im Tessin und mit denjenigen der grösseren deutschsprachigen Kantone. Gemeinsam mit kantonalen Energiefachstellen, industriellen Werken und Universitäten, Durchführung der bereits bewährten, mehrtägigen, geothermischen Wanderausstellungen *Géothermie - douce énergie* in Neuchâtel, Delémont, Sion, Biel, Aarau/Windisch und Martigny.

Internationale Zusammenarbeit

Gemeinsam mit Behördevertretern aus dem Bundesland Baden-Württemberg, vom BUWAL, AWEL, BFE bzw. mit Mitgliedern der FWS, der SVG sowie mit Heat- Contracting Spezialisten der EKZ wurde eine Fachtagung zum Thema **Bewilligungsverfahren für Erdwärmesonden** durchgeführt.

EU Projekt der Deep Heat Mining Association: **European geothermal project for the construction of a scientific pilot plant based on Enhanced Geothermal Systems** (FP6-2002-Energy-1). Seit 2004 wird in diesem Projekt mitgearbeitet (gemeinsame Förderung durch das BFE und BBW).

Mitarbeit am **European Geothermal Energy Council (EGEC)** in Brüssel und an der **International Geothermal Association (IGA)** in Reykjavik (F.-D. Vuataz wurde 2004 zum Member of the Board of Directors gewählt).

Teilnahme am Geothermal Implementing Agreement (GIA) der IEA [4]: Im März 2004 fanden ExCo-Meetings in Paris bzw. in Pisa statt. In Paris wurde der *Swiss Country Report 2005* präsentiert [25]. In Pisa erfolgte sowohl die Prä-

sentation des *Swiss Geothermal Scene 2003* als auch die Vernehmlassung des Schlussberichtes des GIA Annexes III, Subtask C (*Project Management Decision Assistant for Enhanced Geothermal Systems*).

Herr Prof. L. Rybach ist Vice Chairman des *Geothermal Implementing Agreement Executive Committee*. Dadurch wird der Informationsfluss für sämtliche geothermische Aktivitäten gewährleistet. Im Ausland wurden von Herrn Prof. L. Rybach die folgenden Vorträge gehalten:

- **Sustainability aspects of geothermal heat pumps**
- **Use and Management of Shallow Geothermal Resources in Switzerland**
- **Geothermal Legislation and Regulatory Aspects in Selected European Countries**
- **Occurrence and Utilization of Thermal Waters in Alpine Tunnels**
- **Resource Development in a Country with Normal Geothermal Conditions – the Achievements of Switzerland**
- **Neue Methode zur in situ-Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit für Erdwärmesonden-Felder**

Pilot- und Demonstrationsprojekte

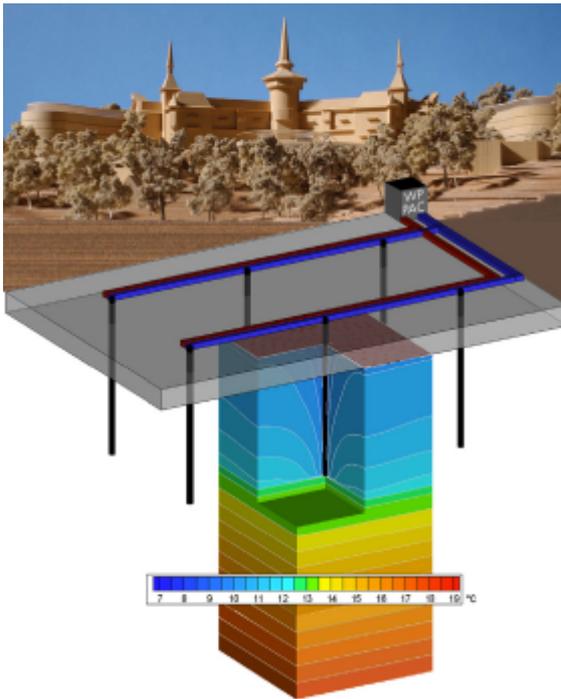
ERDWÄRMESONDEN-FELDER

Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS-Feld Hotel Dolder Zürich [15]: Der Um- und Erweiterungsbau des Grand Hotel *Dolder* wird mit einer komplett neuen Haustechnik versehen (Hotelbetrieb, Wellnessbereich), wobei der Heiz- und Kühlbedarf hauptsächlich durch einen geothermischen Energiespeicher abgedeckt wird. Ziel dieses Projektes ist es, durch speziell durchgeführte Temperaturmessungen das Langzeitverhalten des Speichers zu ermitteln und dieses mit den erstellten Prognoserechnungen zu vergleichen. Mittels einer Finite-Elemente-Simulation wurde das Erdwärmesondefeld bezüglich Wirksamkeit und Kosten optimiert. Verglichen mit der ursprünglichen Auslegung konnte eine starke Effizienzsteigerung erreicht werden. Im kommenden Jahr werden die Installation der EWS und damit die Inbetriebnahme der Messinstrumente erfolgen.

EW-Sondenanlage Überbauung «Bahnhof Süd» in Aarau [16]: Die Daten der Erdwärme-

sondenanlage (Erdwärmesondenfeld) werden seit Juni 2003 erfasst. Die bis jetzt erhobenen Daten ergeben eine mittlere JAZ von 4.1. Acht der insgesamt sechzehn Erdwärmesonden sind im oberen Bereich isoliert. Die technisch-wirtschaftliche Effizienz dieser Isolierung soll 2005 mit derjenigen der nicht isolierten Sonden verglichen werden. Die Klimatisierung des Gebäudes mittels *Free-Cooling* hat sich in den beiden letzten Sommerperioden gut bewährt.

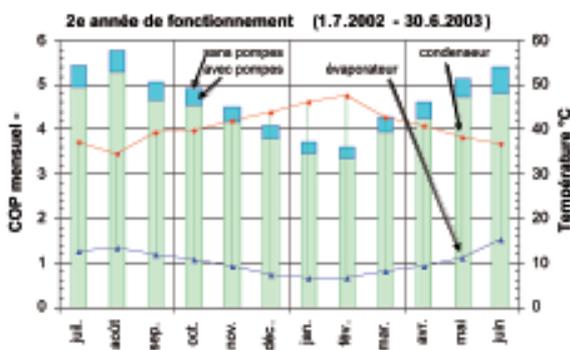
Demonstrationsprojekt zur Energieeffizienz einer grossen Wohnüberbauung (Unteres Hompeli, SG) im Minergie-Standard [17]: Die Überbauung *Unteres Hompeli* besteht aus 4 Häusern, für deren Wärme-Energieversorgung insgesamt 11 EWS mit einer Gesamtlänge von 2'495 m Länge installiert wurden. Die ursprünglich postulierte JAZ von 4.1 der EWS –WP-Anlage konnte bis heute noch nicht ganz erreicht werden. Bis zum Projektabschluss im kommenden Jahr sollen diesbezüglich weitere Betriebsoptimierungen Verbesserungen bringen.



Figur 1: Komputersimulation des EWS – Feldes beim Hotel Dolder in Zürich mit total ca. 10'000 m Sondenlänge (Graphik ENET News©)

Misure di un impianto di riscaldamento con sonda geotermica a Lugano (TI) [18]: Après deux ans de suivi, les performances thermiques de l'installation sont toujours très bonnes et aucune baisse de performance n'a été détectée. Un coefficient de performance annuel (COPA) de 4.1 à 4.2 est mesuré pour la pompe à chaleur (cf. figure 2).

L'injection des gains solaires dans les sondes permet de montrer que le niveau de température du



Figur 2: Evolution du coefficient de performance (COP) mensuel et des niveaux de température à l'entrée de l'évaporateur et à la sortie du condenseur, pondérés par les puissances thermiques transférées.

fluide caloporteur doit monter à environ 20 °C pour obtenir, en fin de compte, une puissance d'injection relativement faible, de l'ordre de 20 W/m, qui est typique d'un refroidissement direct. Les gains solaires non utilisés permettent de remettre 20% de l'énergie annuelle extraite dans le terrain. L'analyse de l'effet de la recharge a montré que l'amélioration du coefficient de performance annuel de la PAC reste modeste et ne suffit pas à compenser l'énergie électrique supplémentaire de la pompe de circulation pour l'injection des gains solaires dans le terrain. Toutefois les performances globales de l'installation ne sont que très légèrement diminuées (1 à 2%), si bien que la recharge solaire est une solution intéressante pour éviter les surchauffes dans les capteurs solaires.

WÄRMENUTZUNG GEOSTRUKTUREN (ENERGIEPFÄHLE)

Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen [19]: Avec une longueur de 500 m sur une largeur de 30 m, il a été construit dans le triangle des pistes. En raison de mauvaises conditions géologiques (terrain meuble formé par d'anciens fonds lacustres), 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.

Les mesures de l'installation utilisant les pieux énergétiques ont débuté en octobre 2004 pour une durée de 2 ans. Le traitement et l'analyse des premières mesures ont débuté afin de contrôler leur qualité. L'analyse des mesures sera effectuée en 2005 dans le but d'analyser la régulation du système pour déterminer s'il existe un potentiel d'optimisation et de tirer un premier bilan énergétique du système.

Messungen Energiepfahlanlage Dividella AG [20]: Die idealen Voraussetzungen von Wärme- und Kältenutzung mit Energiepfählen und Einbindung einer Wärmepumpe sind bei diesem Objekt gegeben. Über die ganze Messdauer stand dem Nutzer immer die gewünschte Energie zur Verfügung. Aus der gesamten Wärmemenge von 328 MWh/a stammen 59% von der Wärmepumpe. Die Kälteenergie mit insgesamt 96 MWh/a teilt sich zu 56% *free-cooling*, 34% Kältemaschinenbetrieb und zu 10% Doppelnutzung (Wärme- und Kältenutzung gleichzeitig). Ausserordentlich positiv ist der problemlose *free-cooling* Betrieb im Hochsommer 03 ausgefallen. Die Erdreichtempe-

ratur zeigt nach einem Betriebsjahr beinahe ausgeglichene Werte.

Regionalgefängnis Rheintal, Altstätten (SG): Beheizung und Klimatisierung mittels Energiepfählen, gekoppelt mit Erdwärmesonden [21]: Im Bereich des Neubaus wurden 114, durchschnittlich ca. 20 m tiefe Pfähle mit Wärmetauscherröhren ausgestattet (Gesamtlänge 2'382 m). Ausserhalb des Gebäudes wurden zusätzlich sechs 150 m tiefe Erdwärmesonden installiert. Den bisherigen Datensätzen zufolge hat bislang keine Auskühlung des Untergrundes stattgefunden. Die ursprünglich postulierte JAZ von 3.8 konnte jedoch noch nicht erreicht werden – dafür müssen bis zum Projektabschluss im Jahr 2005 weitere Betriebsoptimierungen durchgeführt werden.

GRUNDWASSER-WÄRMENUTZUNG

Zweijährige Erfolgskontrolle (Messkampagne) der GW-WP Anlage «Pfarrhaus Bremgarten» [22a]: Für die Beheizung der katholischen Kirche in Bremgarten, inklusive Pfarr- und Pfarrhelferhaus, wurde die bestehende Ölheizung im Frühjahr 2002 zu 37% durch eine GW-WP Anlage substituiert. Diese Anlage befindet sich in einem jahreszeitlich stark schwankenden Grundwasservorkommen. Aufgrund der geringen Mächtigkeit des Grundwassers musste die Anlage mit einem automatischen rückspülbaren Filter und einem Zwischenkreislauf mit Wärmetauscher ausgerüstet werden. Dieser Zwischenkreislauf gewährleistet, dass auch bei periodisch stark schwankenden Grundwasserförderungsraten der Wärmepumpenbetrieb einwandfrei funktioniert. Diese Anlage läuft zufrieden stellend mit einer JAZ von ca. 3.8.

Zweijährige Erfolgskontrolle (Messkampagne) der GW-WP Anlage «Feuerwehrmagazin und Wohnungen Sisseln, (AG)» [22b]: Für die Beheizung des Feuerwehrmagazins und der dazugehörigen Wohneinheiten (inklusive Brauchwasseraufbereitung) wurde die bestehende Ölheizung im Sommer 2002 zu 100% durch eine

GW-WP Anlage substituiert. Die Anlage im Feuerwehrgebäude in Sisseln befindet sich in einem 10 m mächtigen Grundwasserkörper wobei der Wasserspiegel bis rund 2 m UKT [d.h. Unterkante Terrain] reicht. Ohne automatische Einschaltkontrolle der Förderpumpe würde das Grundwasser zeitweise sogar über die Bodenplatte des Gebäudes steigen. Mit der Anlage konnte eine JAZ von 4 erreicht werden.

Grundwasser-Wärmepumpe mit Rückgabe-Turbinierung [23]: Aus einer Tiefe von ca. 50 m wird Grundwasser zunächst zur WP gepumpt und soll dann in einer, im Rückgabeburgen eingebauten Kleinturbine, wieder verstromt werden. Durch die in diesem Projekt anvisierte Stromrückgewinnung könnten die Betriebskosten gesenkt werden. Mit einer geplanten Heizleistung von ca. 170 kW (inklusive Ersatz von 4 alten Heizölanlagen) könnte die Anlage in Würenlos beispielgebend für zukünftige geothermische Grossanlagen werden. Am Prüfstand der Pumpenfirma *Biral* in Münsingen wird zurzeit der Wirkungsgrad einer zur Miniturbine umgerüsteten Grundfos-Tauchpumpe getestet.

NUTZUNG WARMER TUNNELWÄSSER

Wärmenutzung Tunnelwasser, Basistunnel Lötschberg, Südportal [24a]: Das im Basistunnel anfallende Bergwasser wird vom Betriebswasser getrennt abgeleitet. Heutige Schätzungen gehen von einer Schüttmenge von 80-180 Liter/s, bei einer Temperatur von 20–25°C, aus. Es konnten Nutzungsmöglichkeiten für die warmen Tunnelwässer im zukünftigen Gewerbegebiet Raron Ost bzw. Niedergesteln West identifiziert werden. Zusätzliche Möglichkeiten bezüglich Wärmenutzung bestünden für grosse Gewächshausanlagen und zur Beheizung von Fahrbahnen (d.h. bei Vereisungsproblemen der Kantonsstrasse auf der Tal-Südseite, geplante Autobahn). In Bezug auf CO₂-Emissionen würden sich für die Nahwärmeversorgungen folgende Reduktionen ergeben:

Nahwärmeversorgung	Konventionelle Anlage (Heizöl) [t CO ₂ /a]	Wärmeversorgung per Tunnelwassernutzung [t CO ₂ /a*]	Reduktion [%]
Raron Gebiet 1/2	2'310 / 2'500	627 / 802	-72 / -68
Niedergesteln	334	108	-68
Steg/Gampel	914	295	-68

Tabelle 1: CO₂-Einsparpotential bei der Nutzung der Wärme des Tunnelwassers des Lötschberg-Basistunnels mittels Nahwärmenutzung (spezifische CO₂-Emission für Heizöl EL: 265 kg CO₂/MWh Endenergie)

Wärmenutzung Tunnelwasser, Basistunnel Gotthard, Nordportal [24b]: Das im Basistunnel anfallende Bergwasser wird vom Betriebswasser getrennt abgeleitet. Die Prognose der AlpTransit Gotthard AG geht am Portal Nord von 60–555 Liter/s Bergwasser – mit einer Temperatur von 30–34 °C – aus. Folgende Nutzungsmöglichkeiten wurden näher auf ihre technisch-wirtschaftliche Machbarkeit geprüft:

- Nahwärmeversorgungen mit Wärmepumpen
- Einzelwärmepumpen
- Gewächshäuser, Fischzucht, Pilzzucht, Tropenhaus
- Pavillon AlpTransit Gotthard AG (Betriebsphase Basistunnel)

Die Wärmegestehungskosten der betrachteten Nahwärmeversorgung liegen zwischen 8.6 und 14 Rp/kWh verkaufter Wärme. Für Erstfeld liegt der Mittelwert bei 11.4 Rp/kWh. Der Bezugspreis für Elektrizität für die Wärmepumpen wurde dabei für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit 14.9 Rp/kWh vergleichsweise hoch angenommen. Bezüglich CO₂-Emissionen könnten sich bei einer thermischen Bergwassernutzung, im Vergleich zur heutigen Situation, folgende Reduktionen ergeben: (Siehe Tabelle 2)

Auf die betrachteten Gebiete bezogen, könnten Reduktionen jährlich ca. 6'000 t CO₂ ausmachen.

Machbarkeitsstudie Tunnelwasser, Basistunnel Gotthard, Südportal [24c]: Die Prognose

der AlpTransit Gotthard AG geht am Portal Süd von 80-460 Liter/s Bergwasser, mit einer Temperatur von 30-35 °C aus. Folgende Nutzungsmöglichkeiten wurden näher auf ihre technisch-wirtschaftliche Machbarkeit untersucht

- Tropenhaus, Fischzucht
- Gewächshäuser
- Wellnessbad Bodio
- Nahwärmeversorgungen
- Einzelnutzungen für Heizzwecke
- Pavillon AlpTransit in Pollegio
- Thermische Nutzung von Bergwasser mit abschliessender Aufbereitung zu Trinkwasser

Die Wärmegestehungskosten der Nahwärmeversorgung liegen zwischen 9.0 und 12.9 Rp/kWh verkaufter Wärme, mit einem Mittelwert von 10.1 Rp/kWh. Der Bezugspreis für Elektrizität für die Wärmepumpen wurde dabei für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit 17 Rp/kWh vergleichsweise konservativ angenommen. In Bezug auf CO₂-Emissionen wären bei einer thermischen Bergwassernutzung gegenüber der heutigen Situation folgende Reduktionen möglich: (Siehe Tabelle 3)

Auf die betrachteten Gebiete bezogen, könnte eine Reduktion jährlich ca. 3'220 t CO₂ ausmachen.

Nahwärmeversorgung	Konventionelle Anlage (Heizöl) [t CO ₂ /a]	Wärmeversorgung per Tunnelwassernutzung [t CO ₂ /a*]	Reduktion [%]
Erstfeld	3'322	875	-74
Schattdorf	2'415	495	-79
Altdorf	2'466	865	-65
Total betrachtete Gebiete	8'203	2'235	-73

Tabelle 2: CO₂-Einsparpotential bei der Nutzung der Wärme des Tunnelwassers des Gotthard-Basistunnel-Nordportals mittels Nahwärmenutzung (spezifische CO₂-Emission für Heizöl EL: 265 kg CO₂/MWh Endenergie)

Bodio Pollegio Biasca	Konventionelle Anlage (Heizöl) [to CO ₂ /a]	Wärmeversorgung mit Tunnelwassernutzung [to CO ₂ /a*]	Reduktion [%]
Nahwärmeversorgungen	3'61	961	
Einzelanschlüsse	563	139	
Gewächshäuser	610	0	
Total betrachtete Gebiete	4'334	1'100	-75

Tabelle 3: CO₂-Einsparpotential bei der Nutzung der Wärme des Tunnelwassers des Gotthard-Basistunnel-Südportals mittels Nahwärmenutzung (spezifische CO₂-Emission für Heizöl EL: 265 kg CO₂/MWh Endenergie)

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

FORSCHUNG

Nachdem die Finanzierung der ersten geothermischen Tiefbohrungen des **Deep Heat Mining** Projektes in Basel gesichert werden konnte, sollte Mitte 2005 mit den geplanten Bohrarbeiten am Standort IWB Werkhof Kleinhüningen begonnen werden. Ein Konzept zur Einbindung dieses Standorts in das Fernwärmenetz ist erarbeitet. Der grösste Forschungsbedarf besteht jetzt bei der kombinierten Strom- und Wärmegewinnung. In dieser Technologie steckt ein bedeutendes energetisches Potenzial. Mittels Bündelung aller in der Schweiz vorhandenen Fachkräfte soll 2005 mit einem umfassenden Forschungsprogramm *Energieumwandlung* bzw. *Hybrid-Prozesse* begonnen werden (d.h. die aus der Erde gewonnene Energie wird mit einer Feuerung aus bevorzugt erneuerbaren Energieträgern ergänzt um damit eine Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades zu erreichen). Nebst dem Projekt in Basel wurden auch in Genf – unter finanzieller Beteiligung von Kanton und Stadt – die Projektierungsarbeiten für ein HDR-Kraftwerk weitergeführt. Ziel des Programms *Geothermie* ist bis 2010 die Realisierung eines geothermischen Kraftwerks in der Schweiz (mit Strom- und Wärmeproduktion). Mehrere nationale und internationale Forschungsprojek-

te (IEA, EU-Forschungsprogramm) sollen auch in 2005, unter starker schweizerischer Beteiligung, fortgesetzt werden.

Die Forschungsziele 2004 in der untierten Geothermie (EWS, Geostrukturen, geothermischer Response Test, etc.) konnten voll erreicht werden. Damit die Anwendung der Geothermie einen festen Platz im Markt findet, sind für alle Nutzungstechnologien Qualitätssicherungsinstrumente notwendig. Diese müssen entwickelt, überprüft und bei den massgebenden Stellen eingeführt werden.

P+D PROJEKTE

Bezüglich direkter Nutzung von untierten Erdwärme steht die Schweiz im weltweiten Vergleich sehr gut da (Figur 3):

Die Schweiz liegt bei den bevölkerungs- und flächenkorrigierten Werten unmittelbar hinter den Skandinavischen Ländern Schweden, Dänemark und Norwegen, welche die Spitzenplätze belegen. Dies ist wohl auf die, sehr frühzeitig erfolgten Grundlagestudien von Schweizer Forschern auf dem Gebiet der untierten Erdwärmennutzung (Ende der 70iger Jahre), und auf die vom BFE geförderten Aktivitäten der SVG und FWS zurück-

Country	Installed capacity [MWt]	Energy per year [TJ/yr]	Equivalent 12 kW units	Population* [Million]	Capacity per area [W/km ²]	Capacity per capita [W/capita]	Energy per area [GJ yr ⁻¹ km ⁻²]	Energy per capita [GJ yr ⁻¹ cap ⁻¹]	12 kW Equivalent units per km ²
AUS	300.0	1'450	25'000	8.05	3.6E-3	37.3	17.3	0.18	0.30
CDN	446.0	2'186	37'167	31.41	4.5E-5	14.2	0.22	0.07	0.004
CN	631.0	6'569	52'583	1'280	6.6E-5	0.49	0.67	0.005	0.005
CZ	200.0	1'130	16'667	10.21	2.5E-3	19.6	14.3	0.11	0.21
DK	821.1	4'360	68'425	5.38	1.9E-2	152.6	101.4	0.81	1.59
FIN	260.0	1'950	21'667	5.20	7.7E-4	50.0	5.77	0.38	0.06
D	400.0	2'200	33'333	82.48	1.1E-3	4.8	6.16	0.03	0.09
NL	253.5	685	21'125	16.15	6.0E-3	15.7	16.3	0.042	0.50
N	450.0	2'3140	37'500	4.54	1.4E-3	99.1	7.14	0.51	0.12
S	3'840.0	36'000	320'000	8.93	8.5E-3	430.0	80.0	4.03	0.71
CH	532.4	2'854	44'367	7.29	1.3E-2	73.0	69.6	0.39	1.08
USA	7'200.0	22'214	600'000	287.5	7.3E-4	25.0	2.26	0.08	0.06

Figur 3: Weltweiter Vergleich in der Nutzung von geothermischen Wärmepumpen. Die Schweiz liegt in den Kolonnen 6-10 auf den Plätzen 2, 4, 3, 4 und 2 (Werte zusammengesetzt von L. Rybach, basierend auf [29]; * IEA 2004 Key World Energy Statistics)

zuföhren. Bereits vor mehr als 10 Jahren begann sich die SVG für eine Erdwärmenutzung mittels geothermischen Grossanlagen (d.h. EWS-Sondenfelder oder Energiepfähle, Geostrukturen) einzusetzen, die sich heute einer breiten Anwendung erfreuen. In letzter Zeit findet auch das Gebäudekühlen eine stark steigende Verbreitung (ebenfalls mittels Sondenfeldern oder Energiepfählen). Die Wirtschaftlichkeit von derartigen Anlagen ist

dadurch nachgewiesen, da diese sehr häufig mittels *Heat-Contracting* erstellt und betrieben werden (durch Stromproduzenten, wie z.B die EWZ, EKZ, BKW). Erfreulich ist auch die Ausstrahlung von geothermischem Know-How in das nahe und ferne Ausland, was bereits zu etlichen Aufträgen an Schweizer Firmen und Universitätsinstituten geführt hat.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

- [1] R. Minder, (rudolf.minder@bluewin.ch), MINDER ENERGY CONSULTING, Oberlunkhofen: **Energieumwandlungsprozesse für die Nutzung geothermischer Energie** (JB)
- [2] F.-D. Vuataz, (francois.vuataz@unine.ch), ARBEITSGEMEINSCHAFT DHM, Genf: **Deep Heat Mining; Entwicklung der Hot-Dry-Rock/Hot-Wet-Rock Technologie in der Schweiz; 2004. Investigations relatives à l'implantation d'une centrale DHM à Genève** (JB)
- [3] F.-D. Vuataz, (francois.vuataz@unine.ch), DEEP HEAT MINING ASSOCIATION, Steinmaur: **European geothermal project for the construction of a scientific pilot plant based on Enhanced Geothermal Systems**" (JB)
- [4] Th. Mégel, (megel@geowatt.ch), ARBEITSGEMEINSCHAFT GIA, Zürich: **Teilnahme am Geothermal Implementing Agreement der IEA (Annex III, Hot Dry Rock, Subtask C, Fortsetzung 2004)** (SB) ENET 240078
- [5] E. Kissling (kissling@tomo.ig.erdw.ethz.ch), SCHWEIZERISCHE GEOPHYSIKALISCHE KOMMISSION (SGPK), Zürich: **Geothermische Ressourcen. Erarbeitung und Bewirtschaftung des geothermischen Potentials der Schweiz** (JB)
- [6] B. Lachal (bernard.lachal@cuepe.unige.ch), UNIVERSITÉ DE GENÈVE - CUEPE, Genève: **Manuel GEOCOOLING** (JB)
- [7] J. Wilhelm, (jules.wilhelm@bluewin.ch), INGENIEUR-CONSEIL, Pully: **Géostrucures énergétiques- Manuel pour la planification, la construction et l'exploitation (MGE)** (SB)
- [8] L. Rybach (rybach@geowatt.ch), Geowatt AG, Zürich: **Kompilation, Auswertung und Erfolgskontrolle von Messkampagnen an Erdwärmesonden- Energiepfahlsystemen sowie Grundwassernutzungen inklusive Wirtschaftlichkeitsanalysen** (SB) ENET 240087
- [9] W. Eugster (walterj.eugster@bluewin.ch), SVG, Biel: **Gütesiegel «geothermische Quelle» (Qualitätssicherungssystem)** (JB)
- [10] A. Huber (huber@igjzh.com), HUBER ENERGIETECHNIK AG, Zürich: **Erdwärmesonden für Direktheizung. Phase 1: Modellbildung und simulation** (JB)
- [11] H. Graf (h.graf@mbn.ch), MATOUSEK, BAUMANN & NIGGLI AG, Baden: **Arteserkarte der Schweiz – Teilgebiet Basel - Luzern** (SB)
- [12] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, Aarau: **Isolation von Erdwärmesonden: Zusammenstellen der Ergebnisse aus Messprojekten, Vergleich und Auswertung. Vorbereitung für späteres Forschungsprojekt** (SB)
- [13] L. Laloui (lyesse.laloui@epfl.ch), EPFL – ENAC, Lausanne: **Automatisation et télétransmission des données pour les tests de réponse** (SB) ENET 240025
- [14] M. Aymon, (les.bains@lavey-les-bains.ch), LES BAINS DE LAVEY SA, Lavey-les-Bains: **Etude de la valorisation des rejets thermiques des Bains de Lavey** (SB) ENET 240048

Liste der P+D-Projekte

- [15] B. Sigg, (info@doldergrand.ch), DOLDER GRAND HOTEL, Zürich: **Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS-Feld Hotel Dolder Zürich** (JB)
- [16] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, Aarau: **EW-Sondenanlage Überbauung «Bahnhof Süd» in Aarau** (JB)
- [17] Ch. Kapp, (ch.kapp@nek.ch), NEK UMWELTECHNIK AG, Zürich: **Demonstrationsprojekt zur Energieeffizienz einer grossen Wohnüberbauung «Unteres Hompeli», SG im Minergie-Standard** (JB)
- [18] D. Pahud, (daniel.pahud@dct.supsi.ch), LEE – SUPSI, Canobbio: **Misure di un impianto di riscaldamento con sonda geotermica a Lugano (TI)** (SB)

- [19] M. Hubbuch, (m.hubbuch@hswzfh.ch), FH Wädenswil, *Canobbio: Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen* (JB)
- [20] M. Morath, (morath.marcel@lippuner-emt.com), ING. BÜRO LIPPUNER AG, *Grabs: Messungen Energiepfahlanlage Dividella AG* (JB)
- [21] Ch. Kapp, (ch.kapp@nek.ch), NEK UMWELTECHNIK AG, *Zürich: Regionalgefängnis Rheintal, Altstätten (SG): Beheizung und Klimatisierung mittels Energiepfählen, gekoppelt mit Erdwärmesonden* (JB)
- [22] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, *Aarau: a) Zweijährige Erfolgskontrolle (Messcampagne) der GW-WP Anlage «Pfarrhaus Bremgarten» (SB) ENET 240089 • b) Zweijährige Erfolgskontrolle (Messcampagne) der GW-WP Anlage «Feuerwehmagazin und Wohnungen Sisseln, (AG)» (SB) ENET 240088*
- [23] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, *Aarau: Grundwasser-Wärmepumpe mit Rückgabe-Turbinierung* (JB)
- [24] G. Oppermann (gerhard.oppermann@gruneko.ch), GRUNEKO AG, *Basel: a) Wärmenutzung Tunnelwasser, Basistunnel Löttschberg, Südportal (SB) ENET 240086 • b) Wärmenutzung Tunnelwasser, Basistunnel Gotthard, Nordportal (SB) • c) Machbarkeitsstudie Tunnelwasser, Basistunnel Gotthard, Südportal (SB) ENET 240085*

Referenzen

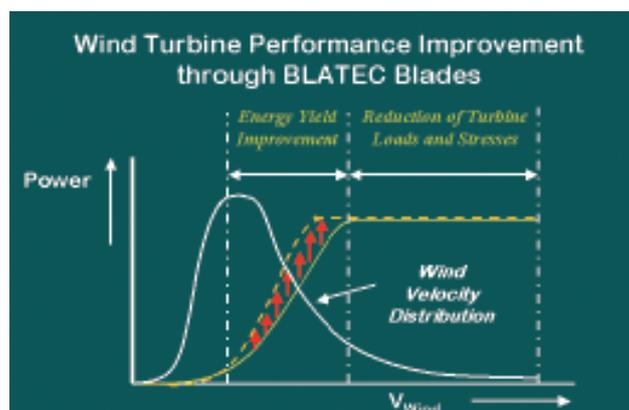
- [25] **2005 Country Update for Switzerland**, L. Rybach and H.L. Gorhan. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey. April 2005 (in press)
- [26] **Energie aus dem Untergrund. Erdspeicher für moderne Gebäudetechnik**. D 0179. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. ISBN 3-908483-52-2, 2003
- [27] **Wegleitung zur saisonalen Wärmespeicherung**. D 028. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. 1989. Normen- und Drucksachenverkauf: Tel. 01 / 283 15 60
- [28] **Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme**. D 0136. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. 1996. Normen- und Drucksachenverkauf: Tel. 01 / 283 15 60
- [29] **Worldwide Direct-Uses of Geothermal Energy 2005**. John W. Lund et al., Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, April 2005 (in press)

PROGRAMM WINDENERGIE

Überblicksbericht zum Energieforschungsprogramm Windenergie 2004

Robert Horbaty

robert.horbaty@enco-ag.ch



Schweizer Unternehmen entwickelt neuartige Rotorblätter für Windkraftanlagen

Auf dem Weg zum intelligenten Rotorblatt: Neuartige betriebliche Pitch- und Twist-Verstellung soll Energieertrag erhöhen und Ermüdungslasten reduzieren, indem bei geringeren Windgeschwindigkeiten die installierte Leistung erreicht wird.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das von der CORE anlässlich der Energieforschungskonferenz im November 2003 präsentierte **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007** [9] hält zum Programm *Wind* u.a. folgendes fest:

*Die Windkraftnutzung in der Schweiz ist, nebst den hohen technischen Anforderungen aufgrund von Standorten im Gebirge, weiterhin mit **Akzeptanzproblemen** konfrontiert. Mit einem nationalen Konzept sollen die gesetzten Ziele von 50 GWh bis 100 GWh bis ins Jahr 2010 räumlich konkretisiert und die notwendigen Planungsgrundlagen erarbeitet werden. Die spezifischen Fragestellungen für **Windkraftanlagen im Gebirge** und eine bedeutende heimische Zulieferindustrie von **Komponenten** für Windkraftanlagen rechtfertigen die Wiederaufnahme der Forschungsaktivitäten. Damit soll auch die Möglichkeit geschaffen werden, in **internationalen Gremien** Erfahrungen auszutauschen.*

Das Energieforschungsprogramm **Windenergie 2004 – 2007** [10] wurde im April 2004 von der CORE genehmigt und zur Umsetzung freigegeben. Die **Schwerpunkte** und **Zielsetzungen** bis 2007 lauten wie folgt:

Qualitative Ziele

- **Koordination** der nationalen Forschungsaktivitäten im Bereich Windenergie.
- Know-how-Aufbau zur **Windenergienutzung im hügligen und gebirgigen Terrain**

- Aufbau eines **Kompetenzzentrums Windenergienutzung im Gebirge**.

Quantitatives Ziel

- Abgestimmt mit den Zielsetzungen von EnergieSchweiz sollen bis ins Jahr 2010 **50 – 100 GWh** Windstrom erzeugt werden.

Schwerpunkt Forschung

- Erhöhung der **Akzeptanz** der Windenergienutzung
- Entwicklung von **innovativen Komponenten**

Schwerpunkt Umsetzung

- Aufbau **Kompetenzzentrum Windenergienutzung im Gebirge**
- Entwicklung von spezifischen **Konzepten**, z.B. für dezentrale Stromproduktion in Randregionen

Sowohl in der Zusammenfassung der Energieforschungskonferenz als auch im *Konzept der Energieforschung 2004 – 2007* geniessen die **P+D-Projekte einen hohen Stellenwert**. Trotzdem wurden die P+D-Mittel des BFE massiv zurück gefahren, d.h. für den ganzen Technologietransfer von der Forschung in den Markt stehen bereits kurzfristig kaum mehr Mittel zur Verfügung. Die Aktivitäten des Programms verlagern sich daher vermehrt von der Umsetzung auf den eigentlichen F+E-Bereich, bis für P+D-Projekte neue Lösungen gefunden werden.

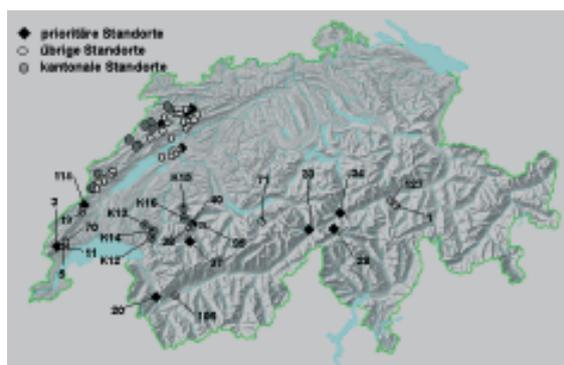
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

ERHÖHUNG DER AKZEPTANZ DER WINDENERGIENUTZUNG

Um einen *Wildwuchs* zu verhindern, regten Landschaftsschutzorganisationen und einzelne Kantone an, der Bund solle eine kantonsübergreifende, konzeptionelle Grundlage für die Entwicklung von Windparks bereitstellen. BFE, BUWAL und ARE haben nun mit dem **Konzept Windenergie Schweiz** [1a] die entsprechenden Grundlagen für die Standortwahl von Windkraftanlagen erarbeitet.

Das Hauptziel des Konzepts war, einen **Konsens zwischen den Interessenvertretern** aus Bund, Kantonen, Energiewirtschaft und Umweltverbänden über Grundsätze und Kriterien für die Wahl

von Standorten für Windparks bis ins Jahr 2010 zu finden. Dazu wurde eine Begleitgruppe aus Vertretern der oben genannten Interessengruppen gebildet. In einem zweiten Schritt wurden mit einer GIS-Modellierung in der ganzen Schweiz 110 potenzielle Windkraft-Standorte identifiziert, welche die Kriterien erfüllen. Die Resultate wurden im Januar 2004 in die Vernehmlassung bei allen Kantonen und den Interessengruppen gegeben. Der Bericht wurde positiv aufgenommen und als Grundlage begrüsst. Aufgrund der Resultate der Vernehmlassung wurde aus den identifizierten Windkraft-Standorten eine Auswahl getroffen (Figur 1).



Figur 1: Darstellung der ermittelten Standorte des Konzeptes Windenergie Schweiz.

Aufgrund der Ergebnisse der Vernehmlassung konnte durch die Arbeitsgruppe der beteiligten Bundesämter eine Auswahl von 12 besonders geeigneten Standorten getroffen werden. Ergänzt mit zusätzlichen, bereits durch die Kantone und Gemeinden bestimmten Standorten, entstand eine Auswahl von **28 möglichen Standorten** mit einem Windenergiepotential von 316 GWh – also dreimal mehr als für die Ziele von EnergieSchweiz benötigt! Die ausgewählten Standorte sollen nun im Rahmen der kantonalen und/oder kommunalen Richt-, bzw. Nutzungsplanung weiter bereinigt werden, so dass zukünftige Windpark-Entwickler mit einer hohen Planungssicherheit diese Standorte erschliessen können. Die nächsten Schritte werden nun im Projekt **Umsetzung Konzept Windenergie Schweiz** [1b] in die Wege geleitet.

Als weiteres Resultat dieses Konzeptes liegen nun **Potentialabschätzungen** vor, welche auf der Basis der effektiv am Standort herrschenden Windverhältnisse und der möglichen Anzahl zu installierender Anlagen ermittelt wurden:

Zeithorizont 2010: 100 GWh:

Definiertes UVEK Ziel für Windenergie im Rahmen von EnergieSchweiz bis 2010: Realisierung von 64 Anlagen an zehn Standorten, z.T. bereits in Planung oder aus Sicht des Landschaftschutzes relativ problemlos.

Zeithorizont 2025: 600 GWh:

Sämtliche kantonalen und prioritären Standorte aus dem Konzept Windenergie Schweiz. Theoretische Energieproduktion an Windparkstandorten = 320 GWh, zusätzlich rund 10% der Einzelanlagen, welche die Kriterien des Konzeptes erfüllen, bringen 280 GWh.

Zeithorizont 2050: 4'000 GWh:

Alle möglichen Standorte aus dem Konzept Windenergie Schweiz sowie alle Einzelanlagen, welche

die Kriterien des Konzeptes erfüllen sind realisiert; nur Standorte mit Windgeschwindigkeiten von über 4.5 m/s im Jahresmittel sind dabei berücksichtigt: ca. 2'850 GWh/a stammen aus Einzelanlagen, 1'150 GWh/a aus Windparks.

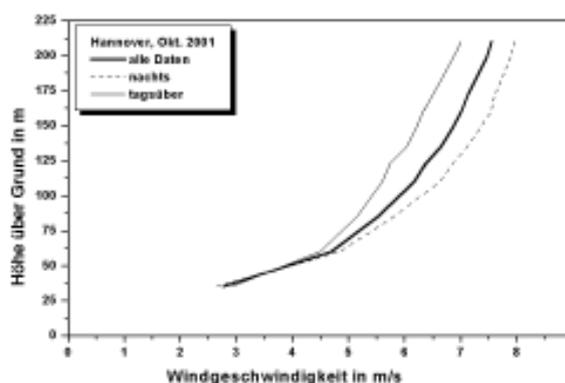
ENTWICKLUNG VON INNOVATIVEN KOMPONENTEN

Das Prinzip eines *intelligenten Rotorblattes* bricht mit einer Reihe fest gefügter Ansichten wie ein Windkraftanlagen-Rotorblatt aufgebaut sein sollte. Das Rotorgewicht sinkt dabei auf die Hälfte. Obwohl der Rotoraufbau mit Holm, Rippen und Bespannung wie im Flugzeugbau zunächst recht konservativ anmutet, steckt in dem Blatt eine Fülle von innovativen Detaillösungen. Für den Blattholm wird vorzugsweise eine hochfeste und steife Konstruktion aus Kohlefaser eingesetzt. Die Rippen können grundsätzlich aus verschiedenen Materialien hergestellt werden; das Unternehmen favorisiert eine sehr leichte Metallkonstruktion in Kastenbauweise (siehe Foto auf dem Titelblatt dieses Berichtes).

Die Blatthaut besteht aus einer mit Glasfasergebebe verstärkten dicken Folie, die eine sehr glatte Oberfläche bietet, womit das aufwändige Schleifen entfällt. Die Unterschiede zur etablierten Bauweise mit verklebten Halbschalen könnte kaum größer sein.

Die Rotorblätter werden die Möglichkeit eröffnen, das Blatt sowohl gesamthaft (Pitch-Verstellung) als auch in seiner Verwindung (Twist-Verstellung) den ständig wechselnden Strömungsbedingungen anzupassen und dies nicht nur für den gesamten Rotor in einheitlicher Weise, sondern auch mit der Möglichkeit einer zyklischen Verstellung.

Das neuartige Blatt kann einerseits den Energieertrag im Teillastbereich steigern, andererseits sich



Figur 2: Mittleres monatliches vertikales Windprofil, nach Tag und Nacht unterschieden.

besser an das jeweils herrschende Höhenprofil der Windgeschwindigkeit anpassen (siehe Figur 2). Langfristiges Ziel des Unternehmens ist ein *intelligentes Rotorblatt*, das sich mit Hilfe von Sensorik und einem eigenen Rotorregler selbstständig an die Strömungsbedingungen am Standort anpasst.

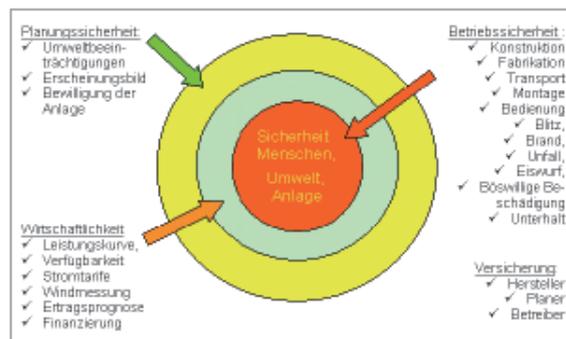
Im Rahmen des Forschungsprojektes **Prototyp Windturbinenrotor mit zyklischer Pitch- und Twist-Verstellung** [4] wird ein Rotormodell als Funktions-Prototyp mit ca. 2,4 m Durchmesser entsprechend der BLATEC-Technologie aufgebaut, welches drei Rotorblätter und die Nabe mit allen Verstellorganen umfasst. Sämtliche Verstellfunktionen werden funktionsfähig realisiert und demonstriert. Das Modell wird als *proof of concept* einer ersten mechanischen Funktions- und Belastungsprüfung unterzogen. Es wird dafür mit einem robusten Getriebe und einem Generator/Motor ausgestattet. Abgeklärt werden auch die Möglichkeiten dieses Technologieansatzes zur Wirkungsgradverbesserung bei anderen axialen Strömungsmaschinen, beispielsweise Kaplan Turbinen in Wasserkraftwerken.

AUFBAU KOMPETENZZENTRUM WIND-ENERGIENUTZUNG IM GEBIRGE

Die Schweiz hat sich politisch im Rahmen ihrer Möglichkeiten der Windenergie verpflichtet. Für die Förderung der Windenergie ist es deshalb wichtig zu wissen, was es für eine sichere und rentable Nutzung von Windkraftanlagen zu beachten gilt. Ziel des Projektes **Sicherheit von Windkraftanlagen in der Schweiz - Richtlinien und Standards** [2b] ist die Darstellung aller wesentlichen sicherheitsrelevanten Aspekte von Windenergieprojekten in der Schweiz und das Aufzeigen von Massnahmen zur **Risiko-Minimierung**. Neben Gefahren für Mensch und Umwelt werden auch rein finanzielle Risiken behandelt (Figur 3).

Dieser Leitfaden richtet sich primär an Bauherren, Planer und Betreiber von Windkraftanlagen. Er soll diesen helfen, das Risiko bei Planung, Bau und Betrieb einer Windenergieanlage zu minimieren. Des weitern sollen die erarbeiteten Richtlinien Behörden, Investoren und Versicherer bei der Beurteilung von Projekten helfen. Hersteller von Windkraftanlagen finden im Leitfaden vor allem die in der Schweiz geltenden Normen und Vorschriften.

Wer eine Windkraftanlage plant und später in Betrieb nehmen will, sollte für dieses Projekt eine umfassende Risikobeurteilung vornehmen. Der Leitfaden zeigt auf, wie dabei vorzugehen ist. Eine Risikobeurteilung zeigt die kritischen Punk-



Figur 3: Entsprechend dieser Systematik sind die Sicherheitsrichtlinien aufgebaut.

te bei der Planung, Bewilligung, Errichtung und beim Betrieb der Windkraftanlage auf. Das Risikomanagement hilft somit, die Windenergie als erneuerbare Energiequelle optimal zu nutzen.

Weitere Projekte mit Schwergewicht auf der Nutzung der Windenergie im Gebirge und Standortabklärungen werden in internationaler Zusammenarbeit durchgeführt, um bereits vorhandene Erfahrungen optimal zu nutzen. Im Rahmen der IEA ist das Projekt **Wind Energy in Cold Climates** [17] und im Rahmen der EU das Projekt **Alpine Wind Harvest** [2a] zu nennen (siehe Kapitel internationale Zusammenarbeit).

ENTWICKLUNG VON SPEZIFISCHEN KONZEPTEN

Die Aventa AG führte im Auftrag des BFE und mit methodischer Unterstützung von INFRAS **Marktstudie Aventa Leichtwindanlagen** [3] durch. Die Studie untersuchte die Marktchancen von Leichtwindanlagen in der Schweiz sowie in Entwicklungs- und Schwellenländern und legte fest, wie die heutige Leichtwindanlage AV-7 weiterentwickelt werden muss, um ihre Marktchancen zu erhöhen. Die Studie zeigt in der Schweiz einen Ökostrommarkt auf, der einen jährlichen Zuwachs aufweist, jedoch keinen klaren Marktgesetzen folgt. Dass Leichtwindanlagen an diesem Zuwachs nur unwesentlich teilhaben, liegt im Wesentlichen an folgenden Hemmnissen:

- zu geringer Bekanntheitsgrad
- fehlendes Lobbying
- zu wenig Mittel für das Marketing
- zu hohe Stromgestehungskosten

Die Stromgestehungskosten der Leichtwindanlagen wurden analysiert und anhand von Parameterstudien wurden mögliche Entwicklungen aufgezeigt. Wesentlichen Einfluss haben die Serien- und die Anlagengrösse. Durch Weiterentwicklung

und Up-Scaling können mit Leichtwindanlagen Stromgestehungskosten von 20 bis 40 Rp./kWh bei mässigen Windverhältnissen erreicht werden.

Leichtwindanlagen würden sich auch für **Entwicklungs- und Schwellenländer** eignen, sofern sie technisch den entsprechenden Gegebenheiten angepasst werden. Interessant sind die vielen potentiellen Standorte sowie die Möglichkeit, Anlagen vor Ort zu bauen. Der Weg führt am ehesten über einen lokalen industriellen Part-

ner, mit dessen Hilfe der Markt, die Grösse und der Technisierungsgrad der angestrebten Anlage zu definieren ist. Bei laufender Produktion ist der Rückimport von einzelnen Baugruppen denkbar.

Als nächste Schritte werden Entwicklungen an der bestehenden AV-7 vorgeschlagen, welche die Stromgestehungskosten weiter senken sollen. Als Ziel wird eine grössere Leichtwindanlage, die AV-30, mit 28 m Rotordurchmesser und 30 kW Nennleistung festgelegt.

Nationale Zusammenarbeit

Ausgehend von den Erfahrungen mit der P+D Windenergieanlage auf dem **Gütsch** [5] wurde im **Energieforschungsprogramm Elektrizität** das Projekt **Hocheffizienter, getriebeloser Antrieb** bearbeitet. Für zwei Leistungsklassen wurden hocheffiziente getriebelose Antriebssysteme für Anwendungen mit tiefen Drehzahlen entwickelt. Mögliche Anwendungen von solchen Antriebssystemen gibt es zum Beispiel bei Industrieantrieben, Seilbahnen und Windkraftanlagen. Für beide Systeme wurden Prototypen entwickelt und geprüft. Beide Prototypen funktionierten zuverlässig und erfüllten die Erwartungen. Beim System mit hoher Leistung (1200 kW, 20 rpm) wurde bei Nennleistung ein Gesamt-Wirkungsgrad von 93.1% erreicht, beim System mit kleiner Leistung (3 kW, 60 rpm) betrug der Gesamt-Wirkungsgrad 85%. Damit weisen diese hier entwickelten Systeme bei Nennleistung ca. 4% weniger Verluste auf als die konventionellen Antriebssysteme mit mechanischem Getriebe.

Die **EPFL (Institut LASEN)** [11] betreut Windenergie-Projekte, insbesondere auch im Zusammenhang mit der Entwicklungszusammenarbeit.

An der **Fachhochschule Wallis** [12] bearbeitet ein Team Projekte zur Nutzung der Windenergie. Aktuell wird ein Projekt formuliert, in welchem in

Zusammenarbeit mit *Aventa*, der *Gebrüder Meier*, *Drivetek* und dem EW Brig-Naters kostengünstige Leistungselektronik zur Steuerung von kleineren Windkraftanlagen entwickelt werden soll.

Die **Suisse Eole** [13] koordiniert alle Aktivitäten zur indirekten Förderung der Windenergienutzung in der Schweiz in Zusammenarbeit mit kantonalen Energiefachstellen, Energieversorgern und Planern. Da die Geschäftsführung und die BFE-Programmleitung *Wind* in Personalunion geführt werden, ist eine optimale Abstimmung sichergestellt. Aufgrund der Empfehlungen einer Evaluation wird sich *Suisse Eole* als eigentliches **Kompetenzzentrum Windenergie** positionieren.

Mit dem Netzwerk **Energie-Cluster** [14] fand im Dezember 2004 eine gemeinsame Tagung zum Thema Forschung und Entwicklung, Transfer, Absatzförderung im Bereich Windenergie statt. Referate sind abrufbar unter <http://www.energie-cluster.ch/Informationen.html>.

Zur Verbreitung der Resultate des Konzepts *Windenergie Schweiz* fanden zwei **Veranstaltungen** statt, im Oktober 2004 in Luzern (ca. 60 TeilnehmerInnen) und im November 2004 in Yverdon (ca. 50 TeilnehmerInnen).

Internationale Zusammenarbeit

Seit Mai 2002 beteiligt sich die Schweiz im *IEA Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development* am Projekt **Wind Energy in Cold Climates** [17]. Ein Treffen dieser Arbeitsgruppe fand im März 2004 in Andermatt statt – mit Besichtigung der Windenergieanlage auf dem Gütsch.

Im Rahmen des obigen Agreements entstand nun die Idee, die aktuellen Fragen im Zusammenhang

mit der Wind- und Wasserkraft Integration weiter vertieft zu diskutieren. Dazu wurde das neue Projekt **Integration of Wind and Hydropower Systems** [18] ins Leben gerufen. Auf Schweizer Seite wurden im Bericht **Windenergie und Schweizerischer Wasserkraftpark** [21], der vom Programm *Energiewirtschaftliche Grundlagen* in Auftrag gegeben wurde, die Grundlagen zu diesem Thema erarbeitet.

Alpine Wind Harvest [2a] ist ein Projekt im Rahmen des **EU INTERREG III B Alpine Space Program** mit dem Ziel: *Development of an Information Base Regarding Potentials and the Necessary Technical, Legal and Socio-Economic Conditions for Expanding Wind Energy in the Alpine Space*. Die Projektpartner stammen aus Österreich, Slowenien, Italien Frankreich und der Schweiz. Projektträger in der Schweiz ist *Suisse Eole*. <http://www.sbg.ac.at/pol/windharvest/>.

Mit dem **Deutschen Windenergie Institut (DEWI)** [20] bestehen enge Beziehungen. So wurden wesentliche Inputs der Aus- und Weiterbildungskurse im Bereich Windenergie von diesem Institut eingebracht.

Gegenseitige **Mitgliedschaften** von *Suisse Eole* bestehen mit der deutschen, der französischen und der europäischen Windenergievereinigung sowie der Fördergesellschaft für erneuerbare Energien in Freiburg im Breisgau.

Die Schweizer Firmen *Vivatec* und die *Gebrüder Meier AG* sind massgeblich an der Entwicklung einer Windkraftanlage der Firma *Leitner* im **Südtirol** beteiligt. Planungsbüros, wie *NEK AG*, *Meteotest* und *ENCO GmbH*, entwickeln **Windenergie-Projekte in Europa** und im Rahmen der **Entwicklungszusammenarbeit**.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Nach der Reparatur eines Risses an einem der drei Rotorblätter der **800-kW-WKA Gütsch** [5] im Dezember 2003 wurde im Januar 2004 ein weiterer Riss in einem anderen Rotorblatt sowie eine Erweiterung des Risses des reparierten Blattes festgestellt. Die *Lagerwey* Anlage wurde daraufhin aus Sicherheitsgründen abgestellt. Es zeigte sich, dass keine grosse Hoffnung bestand, die *Lagerwey*-Anlage auf dem *Gütsch* jemals zufriedenstellend in den Normalbetrieb zu überführen. Eine Richtofferte einer *Enercon E-40* Windenergieanlage für einen möglichen Ersatz der *Lagerwey* war die Grundlage für die weiteren Schritte.

- März 2004: gegenseitige Unterzeichnung eines Rücknahmevertrags mit *ABB* zu fairen Bedingungen.

- Juni 2004: Vertrag mit *Enercon* über die Lieferung einer *Enercon E-40* Windklasse-I-Anlage.



Figur 4: Montage des Rotors der neuen *Enercon E-40*-Anlage auf dem *Gütsch*.



Figur 5: Montage einer 7-kW-Windkraftanlage bei *Rüttenen SO*.

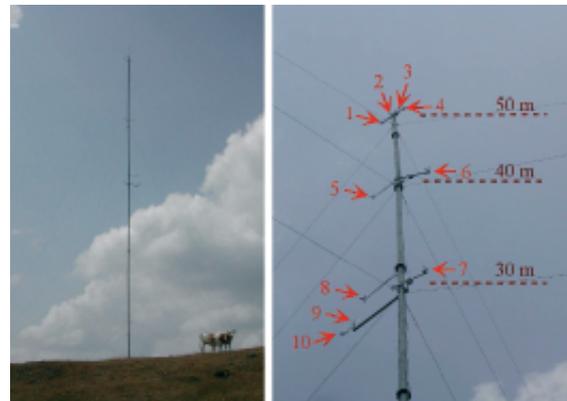
- Juli-August 2004: Demontage und Abtransport der Lagerwey-Anlage sowie Fundamentanpassungen.
- Oktober 2004: Montage und Inbetriebnahme der neuen Windenergieanlage Enercon E-40 (Figur 4).
- November-Dezember 2004: Betrieb der Anlage ohne Probleme sogar bei Sturm mit über 30m/s.

Da das EW Ursern von der Windenergie überzeugt ist und ein Nachfragepotential vorhanden ist, werden im Sommer 2005 Standortabklärungen auf dem Gütsch gemacht. Für mindestens zwei Anlagen sollte auf dem Gütsch noch ein optimaler Standort gefunden werden.

Die Aventa AG in Winterthur entwickelt und baut – als einzige Firma in der Schweiz – komplette Windkraftanlagen. Deren Produkte sind für eher windschwache Standorte ausgelegt. Die **Leichtwindanlage Rüttenen** [6] produziert rund 8'000 kWh Ökostrom für den regionalen Energieversorger (Figur 5).

Weitere P+D-Projekte sind: **Standortabklärungen Les Bréleux** [7a], **Standortabklärungen**

Saint-Brais [7b] (siehe Figur 6), **Projektrelevante Studien und Abklärungen im Zusammenhang mit einem Windenergieprojekt auf dem Gotthardpass** [8].

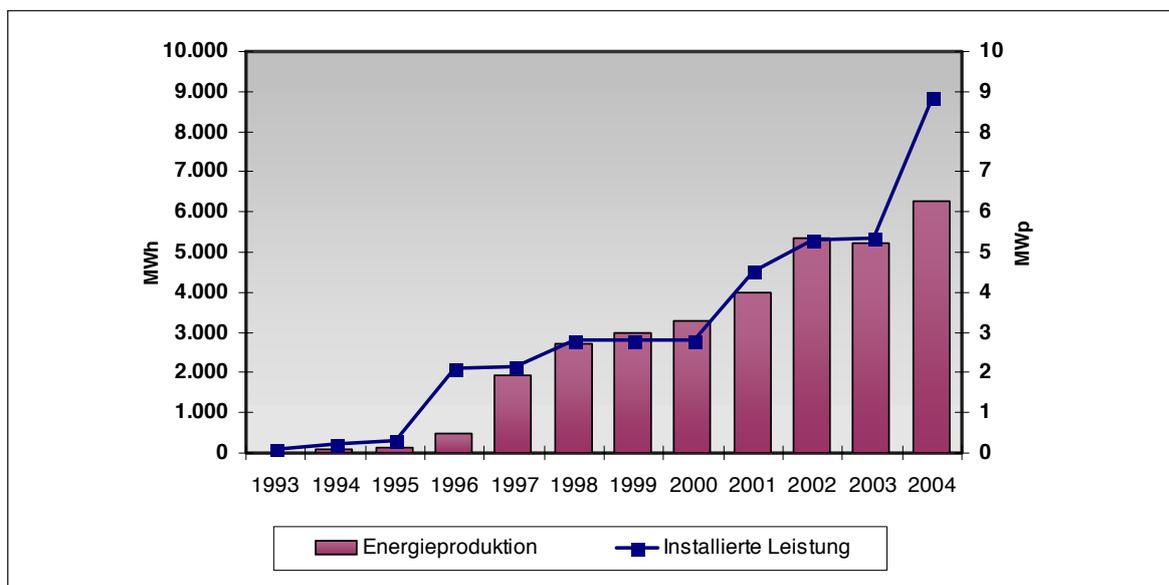


Figur 6: Anordnung der Messsensoren beim 50-m-Messmast in St. Brais; die Nummern bezeichnen unterschiedliche Instrumente auf unterschiedlicher Höhe (geheizte/unbeheizte Anemometer und Windrichtungsgeber).

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Das **Berichtsjahr** war für die Windenergie-Branche in der Schweiz ein gutes Jahr: Die Firma **Juvent SA** installierte auf dem Mt. Soleil, in der Nähe des bestehenden Windparks Mt. Crosin und der grossen PV-Testanlage zwei weitere Windkraftanlagen

mit einer Leistung von je 1.75 MW. Dadurch hat sich die installierte Kapazität der Windenergie in der Schweiz um 65% auf 8.87 MW erhöht. Die 23 in der Schweiz installierten Windenergieanlagen erzeugten im Berichtsjahr 6'274 MWh Elek-



Figur 7: Aktueller Stand der Elektrizitätsproduktion aus Windenergie in der Schweiz.

trizität (Figur 7). Da die beiden neuen Anlagen erst im Oktober installiert wurden, wirkt sich die erhöhte Leistung (noch) nicht in einem gesteigerten Energieertrag aus.

Im **Jahr 2005** wird mit dem Bau einer weiteren Windkraftanlage gerechnet (900-kW-Anlage im Entlebuch). Die Kantone mit einem hohen Anteil an Windenergiestandorten (v.a. im Arc Jurassien) bilden eine Arbeitsgruppe, um den Prozess der Integration dieser Standorte in die kantonale Richt- und Nutzungsplanung zu koordinieren.

Die Auswirkungen von Windkraftanlagen auf Flora und Fauna, auf die Wahrnehmung von Bevölkerung und Touristen ist immer wieder Bestandteil von intensiven Debatten. Im Rahmen einer Studie soll untersucht werden, wie sich im klassischen Dreieck der Nachhaltigkeit Windkraftanlagen auswirken:

- Gesellschaft (Landschaftschutz, Akzeptanz)
- Ökologie, Biologie (Flora, Fauna)
- Wirtschaft (Tourismus, Energieproduktion, zusätzliche Wertschöpfungen/Wertverminderungen)

Resultat dieser Untersuchungen könnte ein *Modell-Umweltverträglichkeitsbericht* sein, gegebenenfalls mit Indikatoren, an denen lassen sich die

Auswirkungen von Windkraftanlagen optimal ablesen liessen. Mögliche Auftragnehmer könnten *Pro Natura, Vogelwarte Sempach* o.ä. sein.

Auf internationaler Ebene ist der Aufbau einer Teststation zur fundierten Ermittlung der Auswirkungen der Vereisung auf dem Gütsch geplant im Zusammenhang mit einem Projekt im Rahmen der *COST Action 27*. Mögliche Partner wären *MeteoSchweiz, Meteotest, EW Ursern*. Die Teilnahme am IEA-Projekt **Base Technology Information Exchange** [19] ist nach wie vor hängig. Es zeichnet sich jedoch ab, dass in naher Zukunft Experten-Meetings zum für die Schweiz relevanten Thema Soziokulturelle Faktoren der Windenergie (Landschaftschutz, Tourismus, Umwelt); *Advanced Wind sensing Techniques* (SODAR, Satellites)durchgeführt werden. Die Arbeiten im Rahmen des Projekts **Wind Energy in Cold Climates** [17] dauerten bis Ende 2004. Die meisten der teilnehmenden Länder möchten diese Arbeiten jedoch weiterführen und zusätzlich sind Deutschland und Österreich an einer Teilnahme interessiert. Ein entsprechendes Gesuch zur Verlängerung soll an der nächsten Sitzung des ExCo des IEA *Wind R&D Implementing Agreement* eingereicht werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

- [1] Stefan Kunz, René Cattin (KUNZ@METEOTEST.CH, [HTTP://WWW.METEOTEST.CH](http://WWW.METEOTEST.CH)), METEOTEST, Bern, **a) Konzept Windenergie Schweiz** (JB) ♦ **b) Umsetzung Konzept Windenergie Schweiz** (SB).
- [2] Robert Horbaty (horbaty@suisse-eole.ch, <http://www.suisse-eole.ch>), SUISSE EOLE, Niederdorf: **a) Alpine Wind Harvest** (<http://www.sbg.ac.at/pol/windharvest/>), (JB) ♦ **b) Sicherheitsrichtlinien für Windenergieanlagen in der Schweiz** (SB).
- [3] Ueli Spalinger (aventa@energienetz.ch, <http://www.aventa.ch>), ARGE AVENTA, Winterthur: **Marktstudie Aventa Leichtwindanlagen** (SB).
- [4] Ferdinand Lutz (ferdinand.lutz@blatec.ch, <http://www.blatec.ch>), Blatec Sarnen: **Prototyp Windturbinenrotor mit zyklischer Pitch- und Twist-Verstellung** (JB).
- [5] Markus Russi (EW-URSERN@BLUEWIN.CH, <http://www.ew-ursern.ch>), ELEKTRIZITÄTSWERK URSERN, Andermatt: **850-kW-WKA Gütsch** (SB).
- [6] ANTON MARTI, Rüttenen: **Leichtwindanlage Rüttenen** (SB).
- [7] Eric Nussbaumer (info@adev.ch, <http://www.adev.ch>), ADEV, Liestal: **a) Les Bréleux** (JB) ♦ **b) Saint-Brais** (JB).
- [8] Ch. Kapp (info@nek.ch, <http://www.nek.ch>), NEK UMWELTTECHNIK AG, Zürich: **Projektrelevante Studien und Abklärungen im Zusammenhang mit einem Windenergieprojekt auf dem Gotthardpass** (JB).

Referenzen

- [9] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007**, ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE: <http://www.energie-schweiz.ch/internet/03095/index.html?lang=de>.
- [10] **Energieforschungsprogramm «Windenergie» 2004 – 2007**, ausgearbeitet durch R. Horbaty, von der CORE am 1.4.2004 zur Umsetzung freigegeben.
- [11] EPFL, **Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne**, Laboratoire de systèmes énergétiques LASEN: <http://lasen.epfl.ch/page39406.html>.
- [12] S. Lillo, **Hochschule Wallis, Institut des systèmes industriels**: GENEOLE - Optimisation de génératrices pour éolienne basse vitesse sans réducteur: <http://energy.hevs.ch/f/rad/conversion.asp>.
- [13] **Schweizerische Vereinigung für Windenergie, Suisse Eole**: <http://www.suisse-eole.ch>.
- [14] **Energie-Cluster**: <http://www.energie-cluster.ch/>.
- [15] **Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz AEE**: <http://www.aee.ch>.
- [16] **Verein für umweltgerechte Elektrizität (VUE)**: <http://www.naturemade.org>.
- [17] IEA-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development, Annex XIX **Wind Energy in Cold Climates**: <http://arcticwind.vtt.fi/>.
- [18] IEA-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development, Annex XXIV: **Integration of Wind and Hydro-power Systems**: http://www.ieawind.org/summary_page_xxiv.html.
- [19] IEA-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development, Annex XI: **Base Technology Information Exchange**: http://www.ieawind.org/summary_page_xi.html.
- [20] **Deutschen Windenergie Institut DEWI**: <http://www.dewi.de>.
- [21] W. Ott (walter.ott@econcept.ch), econcept, Zürich: **Windenergie und Schweizerischer Wasserkraftpark** (SB), abrufbar unter: <http://www.energie-schweiz.ch/internet/03262/index.html?lang=de>.

NUKLEARE SICHERHEIT UND ENTSORGUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Konstantin Fskolos

konstantin.fskolos@psi.ch



Die mikroXAS Strahllinie an der Swiss Light Source (SLS)

Aufbau der Experimentier-Hütte, in welcher durch Streuung des Synchrotronlichts auf die Proben Aufschluss über deren Oberflächenstruktur gewonnen werden kann.

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, das PSI, die KKW-Betreiber, die Nagra und die HSK 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 erforderlichen hohe Flexibilität und Robustheit der Forschung werden durch Forschung auf generischen Gebieten, durch Verstärkung der Vernetzung innerhalb des PSI und durch Aufnahme neuer Hauptaktivitäten im Rahmen internationaler Zusammenarbeiten sichergestellt.

Die strategischen Arbeitsgebiete des NES umfassen 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,
- Unterstützung und Nutzen der weltweiten Arbeiten zur Offenhaltung der Option Kernenergie.

Der NES ist in vier Forschungslabors, entsprechend spezifischen wissenschaftlichen und technischen Kompetenzfeldern strukturiert; er umfasst darüber hinaus eine Sektion, die sich mit Analysen von Energiesystemen befasst und betreibt die Reaktorschule für angehende Reaktoroperateure (Techniker TS).

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 Computercodes und zur Reduktion von Unsicherheiten.
- *STARS*: Entwicklung, Betrieb und Unterhalt eines komplexen Codesystems inkl. Datenbasis für Sicherheitsanalysen (Transiente Systemanalysen mit Unsicherheitsanalyse, Brennstoffmodellierung, 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 fortgeschrit-

tene LWR mittels grossmasstäblicher 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 Computer-codes, einschl. 3D-Effekte u.a. mit CFD.

- Schwere Unfälle: Experimentelle Untersuchung des Aerosolverhaltens (derzeit nach einem Rohrbruch im Dampferzeuger in der *ARTIST*-Anlage) und der Jodchemie während postulierter schwerer Unfälle; Entwicklung und Validierung von Computercode-Modellen, Nutzung der Codesysteme zur Bestimmung der Quellterme für Schweizer KKW.

Labor für Werkstoffverhalten (LWV)

Das LWV untersucht (stark radioaktive) Materialien und Komponenten und ihre umgebungsbedingte Veränderungen, insbesondere durch (a) Studium der Alterungsvorgänge und damit gekoppelter Komponentenschäden und (b) Nachbestrahlungsuntersuchungen nuklearer Brennstoffe. Das LWV betreibt das PSI-Hotlabor mit schwerer analytischer Infrastruktur. Die drei Hauptprojekte im Rahmen der aktuellen LWV-Aktivitäten sind:

- Core Material Behaviour: Mikrostrukturelle/mikromechanische Untersuchungen sowie modelltheoretische Arbeiten zur Alterung von Kerneinbauten (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 Spannungsrissskorrosion 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 Basis für die Entsorgung nuklearer Abfälle durchzuführen, und (b) zusammen mit dem SLS-Team eine mikroXAS-Strahllinie zu bauen und 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.
- Bau und 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.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

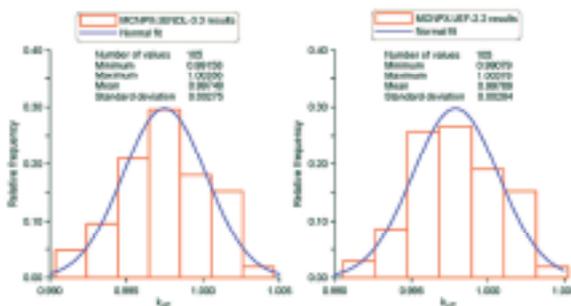
Wie aus der vorangegangenen Einleitung ersichtlich sind die Arbeiten im Rahmen der NES-Projekte breit gefächert und facettenreich, um die unterschiedlichen Bedürfnisse und Interessen der schweizerischen nuklearen Community entsprechen zu können. Eine detaillierte Berichterstattung darüber würde den Rahmen 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. Kritikalitätssicherheitsanalysen im Rahmen von *STARS* wurden traditionell mit dem am PSI

entwickelten deterministischen Brennelement-Transportcode *BOXER* durchgeführt. Da die Experten auf diesem Gebiet seit langem die Notwendigkeit betonen, für diese Art von Sicherheitsbewertungen Monte-Carlo Codes einzusetzen, wurde die Entwicklung einer Monte-Carlo-basierten Methodik für das Projekt unumgänglich. Der Code *MCNPX* (Mehrzweckcode mit kontinuierlichem Energiemodell für den Transport einer Vielzahl neutraler und geladener Teilchen – eine Erweiterung von *MCNP* mit zusätzlichen Hochenergie-Modellen) wurde dazu auserwählt, auch um Bedürfnisse für Forschung zu *ADS*-Systemen, also ausserhalb des *STARS*-Umfangs zu decken.

Es wurden markante Fortschritte bei der Entwicklung einer modernen Methodik zur Analyse kompakter Lagerbecken für abgebrannte Brennelemente erzielt, basierend auf 135 Anordnungen, die aus dem *International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments* ausgewählt wurden. Für jede dieser Anordnungen wurden 3-D Modelle entwickelt und für Rechnungen mit *MCNPX* (Version 2.4.0) genutzt, wobei zwei moderne Wirkungsquerschnitts-Bibliotheken mit kontinuierlichem Energiemodell zum Einsatz kamen: *JEF-2.2*, erzeugt von ENEA Bologna und *JENDL-3.3* erzeugt von JAERI. Die Studie zielt darauf, den Bias der berechneten k_{eff} -Werte und das Toleranzintervall zu bestimmen, um die notwendige Marge abzuleiten, die sicherstellt, dass die Sicherheitsgrenzen für jede beliebige Anordnung eingehalten werden.



Figur 1: Vorläufige Resultate der statistischen Evaluation der k_{eff} -Verteilungen für ausgewählte Anordnungen. Zum Vergleich wird auch eine gefittete Normalverteilung gezeigt. Links: Resultate mit *JEF-2.2*, rechts Resultate mit *JENDL-3.3*.

Vorläufige Evaluationen für einen Teil der analysierten kritischen Probleme werden für beide Bibliotheken auf Figur 1 gezeigt: Die k_{eff} -Resultate scheinen normal verteilt zu sein und die zwei gefitteten Gauss'schen Verteilungen zeigen sehr ähnliche Werte für den Mittelwert und die Stan-

dardabweichung. Derzeit zielen die Arbeiten darauf, den Effekt der Wahl der Grösse der k_{eff} -Klassen auf den Mittelwert und die Standardabweichung zu studieren, um eine robuste Evaluation zu erhalten. Parallel dazu wurde die rechnerische Marge mit der letzten *BOXER*-Version revidiert und hat Resultate sehr ähnlich zu jenen des beschriebenen stochastischen Ansatzes geliefert.

Human Reliability Analysis (HRA) [2]: Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit und mit Unterstützung der HSK durchgeführt. Die Analyse entscheidungsbezogener Fehler ist eine zentrale Frage bei den probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) der Kernkraftwerke. Während frühere Methoden auf das mögliche Auslassen verlangter Aktionen fokussierten, betrifft heute die Herausforderung Fehler, welche zur Ausführung ungeeigneter Aktionen führen würden (Kommissionsfehler). Diese Fehler umfassen die Fehlinterpretation des Anlagenzustandes, die Wahl ungeeigneter Massnahmen oder eine Kombination der beiden. Sie sind deshalb wichtig, weil sie nachfolgende menschliche Handlungen negativ beeinflussen könnten, während sie im Allgemeinen schwer zu identifizieren und zu korrigieren sind.

Nach qualitativen Arbeiten betreffend die Analyse von Aufgaben und die Leistungsfaktoren für das Treffen von Entscheidungen, befassen sich die aktuellen Arbeiten mit der Abschätzung von Wahrscheinlichkeiten für Entscheidungsfehler. Diese Quantifizierung ist schwierig, weil viele Faktoren relevant sein können, während die Leistungsfähigkeit nur gegenüber wenigen Faktoren sehr empfindlich sein kann, stark abhängig vom Situationskontext. Wegen dieses Mangels an Regelmässigkeit, sind die Aggregation von Daten und die Ableitung von allgemein repräsentativen Abschätzungen problematisch.

Derzeit wird eine Alternativmethode basierend auf Referenzfällen entwickelt. Im Gegensatz zu den Tabellen von Abschätzungen, die für generische Manipulationsaufgaben existieren, betreffen die Referenzfälle spezifische Situationen. Um einen entscheidungsbezogenen Fehler bei einer neuen Situation von Interesse zu quantifizieren, wird der am besten passende Referenzfall identifiziert und seine Abschätzung wird auf der Basis der Differenzen zwischen den Fällen angepasst. Somit strukturiert die Methode die Expertenmeinung und liefert einen Basiswert für die Abschätzung.

Im Rahmen dieser Methode wurde das Problem des Findens eines passenden Referenzfalles angegangen. Weil mehrfache Kommissionsfehler in einem Szenario auftreten können, muss die

Auswahl auf einer höheren Ebene getroffen werden als bei Auslassungsszenarien, in welchen der passende Fall typischerweise die gleiche Aktion in einem anderen Szenario ist. Zwei Elemente werden kombiniert um den passenden Fall zu bestimmen, eine *Situationsschablone* und die charakteristischen Merkmale der Situation. Die Schablone beschreibt die strukturelle Beziehung zwischen Aufgabe und Situation. Eine solche Schablone betrifft, zum Beispiel, wissensbasierte Störfallmassnahmen, welche nicht durch Vorschriften erfasst sind. Wird einmal die anwendbare Situationsschablone identifiziert, basiert der passende Fall auf den dominanten gemeinsamen Merkmalen; diese Faktoren wurden in einer früheren Studie realer Fälle identifiziert.

Im Berichtsjahr wurden passende Fälle innerhalb einer Datenbank von Kommissionsfehlern analysiert und untersucht. Die Evaluation zeigte, dass die situationsbezogenen Faktoren sowohl für die Auswahl als auch für die Anpassung der Referenzfall-Abschätzungen geeignet sind.

LWR-PROTEUS [3]: Das Projekt findet mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW statt. Im Berichtsjahr wurden nach Empfehlung des *PROTEUS* Project Management Board, die Projektressourcen zu einem grossen Teil der Weiterentwicklung des *LIFE@PROTEUS-Konzeptes* gewidmet; dieses bildet die Basis für die nächste Phase der experimentellen Arbeiten an der *PROTEUS*-Anlage nach Abschluss des laufenden Programms Ende 2005. Parallel hat der PSI-Direktor prinzipiell grünes Licht zur Nachrüstung von *PROTEUS* gegeben und somit interne Personalressourcen zur aktiven Mitarbeit an den Auslegungsarbeiten ermuntert.

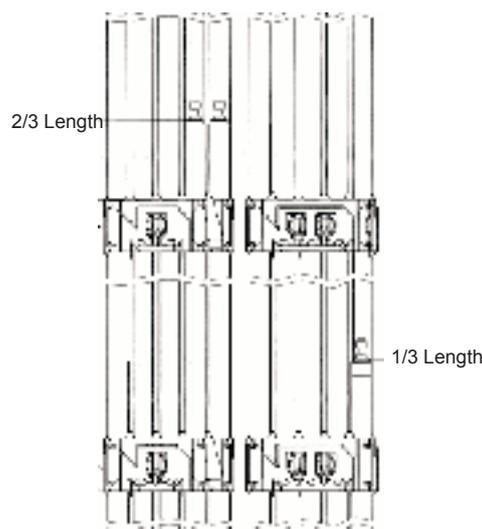
Bezüglich des laufenden Programms, wurde der experimentelle Teil der Phase III mit dem Kritischfahren der Anlage am 29. Oktober initiiert; diese Phase umfasst folgende Hauptziele:

1. Messungen simulierter Voideffekte zur Abklärung von Problemen mit k_{∞} und Void-Reaktivitätskoeffizienten, die offensichtlich mit den Wirkungsquerschnitts-Bibliotheken gekoppelt sind.
2. Messungen von Spaltungs- und Einfangs-Reaktionsraten an den und um die Extremitäten von teillangen Brennstoffstäben zur Erzeugung einer wertvollen Datenbank zur Validierung berechneter axialer Verteilungen.
3. Entwicklung und Erprobung neuer Messtechniken, die im Rahmen von *LIFE@PROTEUS* eingesetzt werden sollten.

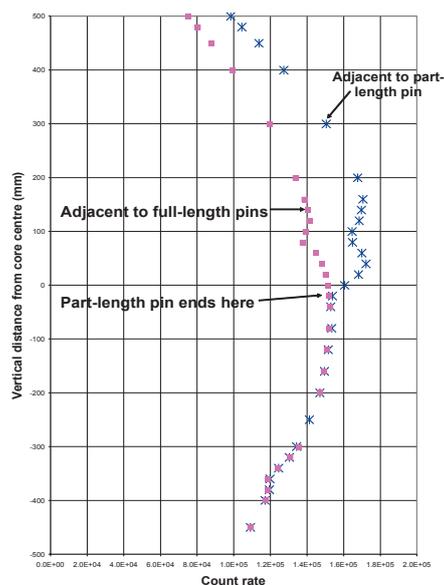
Bis jetzt wurden Spaltkammer-Scans in der Nachbarschaft von normalen und teillangen Brennstoffstäben aufgenommen (s. Figur 2); γ -Scanning

wurde in Angriff genommen. Es wird beabsichtigt, detaillierte dreidimensionale Verteilungen von Spaltungs- und ^{238}U -Einfangsraten zu erzeugen, insbesondere an den und um die Extremitäten der teillangen Stäbe.

Zum ersten Mal hat zudem eine Diplomandin der EPFL am *PROTEUS* Reaktionsraten im inneren eines Brennstoffstabes radial und azimuthal gemessen.



Part-length fuel pins in an Optima2 BWR assembly



^{235}U Fission Chamber Scans Adjacent to Full and Part-length Fuel Pins

Figur 2: Spaltkammer-Scans aufgenommen in der Nachbarschaft von normalen und teillangen Brennstoffstäben.

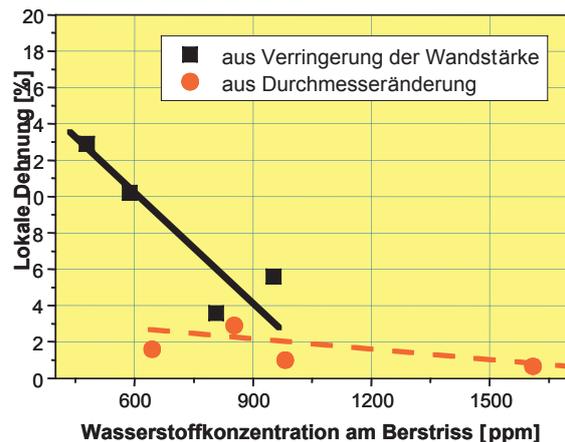
CMB (Core Materials Behaviour) [4]: Core Materials Behaviour (Verhalten von Kernmaterialien) ist seit April 2004 der neuer Name des ehemaligen Projektes *EDEN*. CMB, das in enger Zusammenarbeit und mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW stattfindet soll sich auf Alterungsmechanismen von Werkstoffen konzentrieren, die in einem Reaktorkern Strahlung ausgesetzt sind, mit besonderem Fokus auf Hüllrohrmaterialien, die die erste Barriere gegen Radioaktivitätsfreisetzung bilden.

Das internationale Bersttest-Programm *NFIR-III* wurde durchgeführt, um die Materialeigenschaften von bestrahltem und stark hydriertem Zircaloy-4 zu bestimmen, das Hüllrohrmaterial von Hochabbrand-Brennstoffstäben. Ein Resultat war, dass Hüllrohrproben, die in den Bersttests bei bedeutend niedrigerem Druck barsten als erwartet, eine oder mehrere Hydridlinsen aufwiesen. Im nachfolgenden Programm *NFIR-IV* wurden das mechanistische Verständnis der Rolle einer Hydridlinse im Hüllrohr und ihr Effekt während eines Berstvorganges im Detail untersucht. Neue Bersttests an bestrahlten Zircaloy-4 Hüllrohrproben mit und ohne Hydridlinsen wurden am PSI durchgeführt. Nach dem Bersten der Proben mit den Hydridlinsen in der Berstbox des Hotlabors wurden mit dem Raster-Elektronenmikroskop Fraktographien und Metallographien aufgenommen, um den Bruchmechanismus zu bewerten. In allen Fällen wurde der Riss etwa in der Mitte der grössten Hydridlinse initiiert und schritt von aussen nach innen in beiden Richtungen fort.

Proben mit Hydridlinsen brachen bei bedeutend niedrigerem inneren Druck als solche ohne Hydridlinsen. Die lokale Dehnung in der Nähe des Risses wurde anhand der gemessenen Verringerung der Wandstärke berechnet und mit der Dehnung verglichen, die sich auf den ganzen Hüllrohrumfang bezieht. Die lokale Hydridkonzentration wurde mittels Raster-Elektronenmikroskopie mit Elektronrückstreuung bestimmt, in der Nähe der Hydridlinsen und dort, wo die Verringerung der Wandstärke gemessen wurde.

Ein wichtiges Resultat ist der Nachweis, dass, wie die aus der Verringerung der Wandstärke berechnete lokale Dehnung zeigt, bestrahlte und stark hydrierte Hüllrohre fähig sind, wesentlich höhere Spannungen auszuhalten, als jene, die durch Messung der Durchmesseränderung (d.h. bezogen auf den ganze Umfang) konventionell abgeleitet werden (s. Figur 3).

INTEGER (Bauteilsicherheit) [5]: Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit und mit finanzieller Unterstützung der HSK durchgeführt und ist gut



Figur 3: Bersttests an Brennstab-Hüllrohre mit Wasserstoffakkumulierungen: Lokale Dehnung aus Durchmesseränderung (ganzer Umfang) vs. Verringerung der Wandstärke (lokal am Riss).

im 5. EU-Rahmenprogramm eingebettet. Thermo-mechanische Ermüdung (TME) ist ein langfristiger Mechanismus von Werkstoffschädigung in Kernkraftwerken (KKW) insbesondere im Hinblick auf die Alterung von Komponenten und laufende Aktionen zur Lebenszeit-Verlängerung. Im Allgemeinen sind die aktuellen TME-Parameter bekannt und werden überwacht. Trotzdem zeigte das Auftreten mehrerer thermischer Ermüdungsschäden in KKW, dass gewisse Vermischungsphänomene nicht adäquat berücksichtigt wurden. Diese treten vor allem in T-Stücken, Stutzen mit thermischer Ummantelung und anderen Komponenten auf, die hochzyklischen thermischen Belastungen ausgesetzt sind.

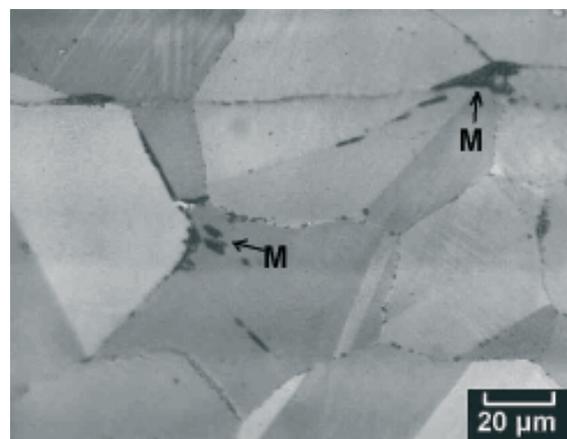
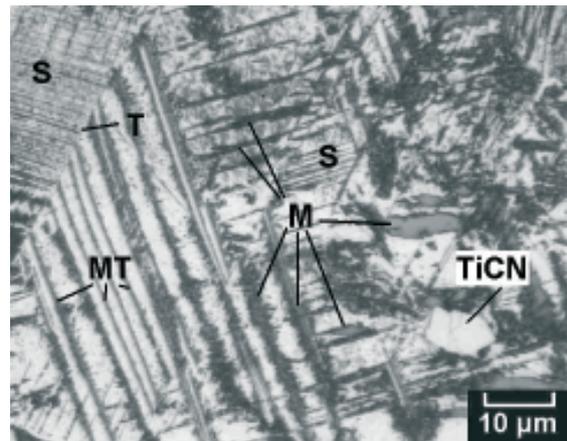
In rostfreien Stählen findet unter dem Einfluss zyklischer Belastungen eine teilweise Transformation von Austenit zum Martensit statt. Es wurde gefunden, dass die verformungsinduzierte Bildung des Martensits neben Lastparametern, wie Dehnungsamplitude, Anzahl Zyklen und Testtemperatur, auch von gewissen Materialeigenschaften beeinflusst wird. Der Effekt des Materialzustandes d.h. der aktuellen chemischen Zusammensetzung, der Verarbeitung und der abschliessenden thermischen Behandlung auf die Martensit-Bildungsrate während der Ermüdung sollte daher untersucht werden. Es wurden Proben verschiedener Produkte (Stange, Platte, Rohr) aus verschiedenen Chargen, aber gleicher Stahlqualität X6CrNiTi18-10 (AISI 321) analysiert. Der Volumenanteil von Martensit wurde im Vorstadium zur Bestimmung der Restlebensdauer genutzt. Der Martensitgehalt wurde mit Neutronendiffraktion und fortgeschrittenen magnetischen Methoden gemessen. Die Morphologie des verformungsinduzierten Martensits wurde mittels optischer Metallographie,

Rasterelektronenmikroskopie sowie mittels Transmissions-Elektronenmikroskopie charakterisiert.

Obwohl die Proben für die niederzyklische Ermüdung aus dem gleichen austenitischen rostfreien Stahl gezogen wurden, war die Anfälligkeit zur Bildung von verformungsinduziertem Martensit in Abhängigkeit der Produkte ziemlich unterschiedlich. Bei der technischen Rissinitiierung (5% Abnahme der maximalen Dehnungsamplitude) variierte der Volumenanteil des Martensits von 55.5 % für das Plattenmaterial ($\Delta\varepsilon/2=0.30\%$, RT), über 15.6 % für das kaltverformte Stangenmaterial ($\Delta\varepsilon/2=0.40\%$, RT) bis zu nur 1.5 % für das Rohrmaterial ($\Delta\varepsilon/2=0.30\%$, RT). Es wurde gefunden, dass der Grund für die unterschiedlichen Materialverhalten in kleinen Variationen der chemischen Zusammensetzung und der thermischen Endbehandlung lag.

Die Analyse des Mechanismus der Martensitbildung führte zu einigen Resultaten: Im angelieferten Zustand des Plattenmaterials sind neben α' -Martensit auch Spuren von ε -Martensit vorhanden. Nach der zyklischen Belastung war kein ε -Martensit mehr feststellbar. Es wurde gefolgert, dass die ε -Martensit-Phase kurzlebig ist, dass sie als Nukleus zur Bildung von α -Martensit dient, und dass bei Ermüdung eine prompte Transformation zum α' -Martensit stattfindet. Der Mechanismus der Martensitbildung im Plattenmaterial ist daher unterschiedlich von jenem im Stangen- und Rohrmaterial, in welchen eine direkte Transformation von Austenit zu α' -Martensit mit Nukleation an den Schnittpunkten von Gitterdefekten beobachtet wurde. Im Plattenmaterial findet die Nukleation von α -Martensit offensichtlich in den kleinen ε -Martensit-Körnern statt. Auch die thermische Schlussbehandlung des Stahls hatte einen Einfluss auf die Martensitbildung durch Ermüdung: Gitterdefekte aus der Kaltverformung wie Gleitbänder oder Mikrozwillinge wirken wie Nuklei für die Transformation von Austenit zu α' -Martensit. Solche Defekte existieren nicht im lösungsgeglühten Material, und Ermüdung generiert nur wenige davon (Figur 4).

Forschung zu Schwere Unfällen [6]: Die Aktivitäten zu diesem Thema laufen mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW und sind stark im 5. EU-Rahmenprogramm eingebettet. Das Projekt ARTIST (AeRosol Trapping In a STeam Generator) wurde vom PSI lanciert, um die Rückhaltung von Aerosolen und Tröpfchen nach dem Bruch eines Heizrohrs im Modell eines Dampferzeugers (DE) unter trockenen und nassen Bedingungen sowie hinsichtlich Accident Management Massnahmen zu untersuchen. Es besteht aus sieben Phasen, welche sich mit folgenden Fragen

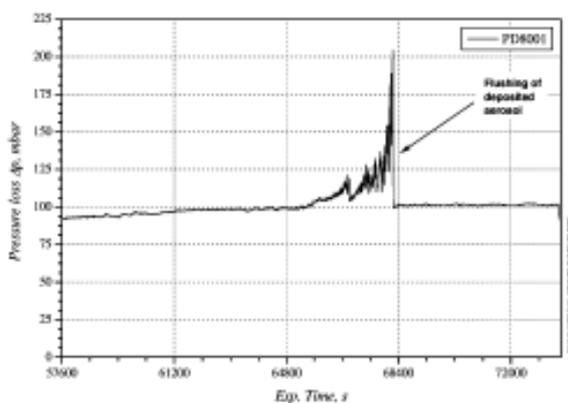


Figur 4: Mikrostruktur nach Ermüdung im Stangenmaterial (oben) und im Rohrmaterial (unten), AISI 321 - M: Verformungsinduzierter Martensit, S: Gleitbänder, T: Zwillinge, MT: Mikrozwillinge.

befassen: 1) Aerosolrückhaltung a) in DE-Rohren, b) im Bündel in der Nähe des Bruches, c) im Bündel-Fernfeld, d) im Separator und Trockner, e) im gefluteten Bündel, f) im ganzen DE und 2) Tröpfchenrückhaltung im Separator und Trockner.

Im vergangenen Jahr wurden sechs Aerosolrückhaltungstests durchgeführt: Vier in DE-Rohren und zwei im gefluteten Bündel. Die Tests in DE-Rohren, durchgeführt mit Gasgeschwindigkeiten nahe der Schallgeschwindigkeit, zeigten, dass eine Aerosolrückhaltung bis zu 50% erreicht werden kann, wenn das Rohr eine U-förmige Biegung aufweist. Die Tests zeigten auch die Tendenz der Aerosolpartikel beim Passieren der Schallfront am Rohrbruch in viel kleinere Partikel zu zerfallen, ein Phänomen, das erstmals experimentell beobachtet wurde. Die Tests im gefluteten Bündel zeigten, dass praktisch alle Aerosole zurückgehalten werden, auch wenn die Bruchstelle mit nur wenig Wasser überdeckt ist (Dekontaminationsfaktoren in der Größenordnung von 1000).

Figur 5a zeigt den Druckabfall über die U-förmige Rohrbiegung in Funktion der Zeit. Die Resultate dieses Tests zeigen, dass innerhalb des Rohres sehr dynamische Prozesse stattfinden, mit alternierendem Aufbau und Ablösen von Aerosolablagerungen. Figur 5b zeigt die innere Oberfläche des geraden Rohrteils nach dem Test. Eine relativ dicke Aerosolablagerung kann klar beobachtet werden; sie weist darauf hin, dass Aerosole gegen die Wände abgelenkt werden, obwohl das Gas in axialer Richtung fließt. Dieses Resultat illustriert das Phänomen des durch Turbulenz induzierten Aufpralls von Aerosolen an der Rohrwand.



Figur 5a: Druckabfall an der Biegung des Dampferzeuger-Rohres.



Figur 5b: Post-test Photographie der inneren Oberfläche des Dampferzeuger-Rohres mit Aerosolablagerung.

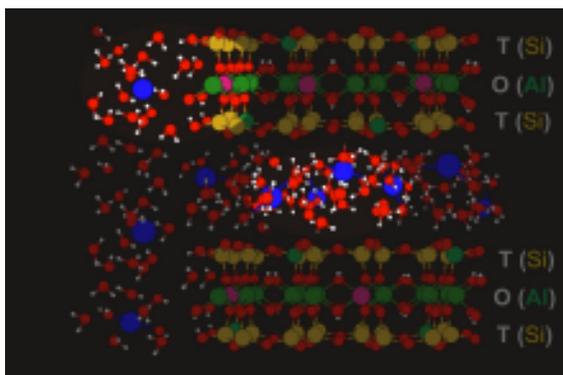
Entsorgung Radioaktiver Abfälle [7]: Die F&E zur Entsorgung radioaktiver Abfälle am PSI spielt eine wichtige Rolle auf nationaler Ebene, indem sie die Bundesregierung und die Nagra bei ihrer Aufgabe zur sicheren Entsorgung der Abfälle der KKW, aber auch aus Anwendungen in der Medizin, der Industrie und der Forschung unterstützt. Das Kompetenzfeld umfasst Grundlagen der Tiefenlagerchemie, der Chemie und Physik von

Radionukliden (oder schweren Elementen) an der Phasengrenze fest/flüssig und von festen Lösungen, sowie den Transport und die Retardierung von Radionukliden in geologischen und künstlichen Lagerkomponenten. Die Untersuchungen sind eine ausgewogene Kombination experimenteller Aktivitäten im Labor, an Grossanlagen sowie im Feld und theoretischer Modellierung. Sie sind orientiert in Richtung des Sicherheitsnachweises von Endlagern in der Schweiz. Die Arbeit ist stark in internationalen Kooperationen auf bilateraler und multilateraler Basis eingebettet.

Tone sind wichtige Systemkomponenten eines geologischen Endlagers. Sie sind Bestandteile des Verfüllmaterials in der Kaverne und der Wirtgesteine. Eines der wichtigsten Merkmale von Tonen ist ihre Dichtigkeit und ihre Sorptionsfähigkeit und daher bilden die Diffusion und die Wechselwirkungen der Radionuklide auf bzw. mit Tonoberflächen einen zentralen Punkt der Arbeit am PSI. Es werden Experimente mit aquatischer Chemie und spektroskopischen Methoden durchgeführt und mechanistische Modelle entwickelt. Bei den Entwicklungen liegt der Trend eindeutig beim atomistischen Verständnis der relevanten Mechanismen zur Ergänzung der thermodynamischen und phänomenologischen Modellierungsansätze.

Im Berichtsjahr starteten die Arbeiten zur molekularen Modellierung der Radionuklid-Mobilität in Tonsystemen. Zusammen mit Information aus modernen experimentellen Techniken wie Röntgenabsorptions- und Laserfluoreszenz-Spektroskopie bietet dies eine einmalige Gelegenheit zum mechanistischen Verständnis der Vorgänge. Derzeit konzentriert sich die Arbeit auf die Beschreibung des Protonentransfers an Tonkanten und auf das Ionenclustering im Zwischenschichtwasser (s. Figur 6). Es konnte gezeigt werden, dass bei niedrigem pH nur $\equiv\text{Al-OH}$ und $\equiv\text{Al-O}$ Kanten Protonen aufnehmen können, während Protonenabgabe bei hohem pH auf $\equiv\text{Al-OH}$, $\equiv\text{Al-OH}_2$, $\equiv\text{Si-OH}$ Kanten stattfindet. Dieses Resultat ist wichtig für die thermodynamische Modellierung der Radionuklid-Komplexbildung an Grenzflächen. Des Weiteren haben Rechnungen gezeigt, dass die Wasserviskosität in der Ton-Zwischenschicht und die NaCl-Löslichkeit stark von der Tonkompaktierung abhängig sind. Dies hat Folgen für die Diffusion und Speziation von Radionukliden in der Zwischenschicht.

Im Hinblick auf den Aufbau der mikroXAS-Strahllinie an der Synchrotron-Lichtquelle des PSI (SLS) fokussierte im 2004 die Arbeit auf den Bau der Strahllinie und die Installation der Komponenten. Wichtige Meilensteine waren die Installation des Frontend, des Spiegels, des Monochromators und



Figur 6: Visualisierung des Ionenclusterings im Zwischenschicht-Wasser (Mitte) und des Protonentransfers an den Kanten der Tonschichten (links oben).

der Insertionsvorrichtung. Das erste Synchrotronlicht in der mikroXAS-Strahllinie wurde im August 2004 nachgewiesen. Dieser Höhepunkt war gefolgt von der noch andauernden Inbetriebnahme-Phase, welche strenge Tests der optischen und diagnostischen Komponenten sowie erste Testexperimente umfasste. Im Sommer 2005 soll die Strahllinie für externe Benützer freigegeben werden.

Im Laufe von 2004 wurden wesentliche Fortschritte bezüglich der Messung aktiver Proben an der mikroXAS-Strahllinie gemacht. Nachdem der PSI-Strahlenschutz (SU) und das Bundesamt für Gesundheit (BAG, Aufsichtsbehörde der SLS) das vorgeschlagene Konzept prinzipiell gutgeheissen haben, wurde in Zusammenarbeit mit der Konstruktionsabteilung des PSI ein Probenhalter für aktive Proben ausgelegt. Derzeit werden Fragen des Containmentsystems, der Dekontamination, der Transportprozesse und der Messprotokolle an der Strahllinie abgeklärt; sie werden anschliessend erneut mit SU und BAG besprochen.

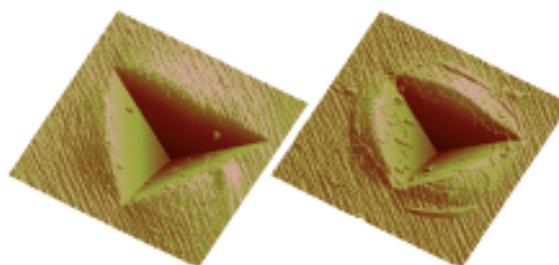
SICHERHEITSBEZOGENE MERKMALE ZUKÜNFTIGER REAKTORKONZEPTE

Hochtemperaturmaterialien [8]: Das Projekt Hochtemperatur-Materialien (HT-MAT) startete im April 2004 mit dem Ziel wesentliche Beiträge zur Auswahl geeigneter Werkstoffe für Reaktorsysteme der Generation IV zu liefern und das Verhalten solcher Werkstoffe mittels detaillierter Modelle zu beschreiben. Am PSI wurden drei Hauptklassen von Werkstoffen zur Untersuchung ausgewählt: Faserverstärkte Keramiken (wie SiC/C oder SiC/SiC), intermetallische Werkstoffe (wie TiAl) und Oxiddispersionverstärkte (ODS) Legierungen.

ODS-Legierungen bestehen aus einer metallischen Matrix mit fein verteilten Oxidpartikeln mit

einem mittleren Durchmesser von 20–30 Nanometer. Diese Partikel verbessern die Hochtemperatur-Festigkeit und -Kriechresistenz. ferritisch-martensitische ODS-Stähle werden als mögliche Strukturwerkstoffe für die zukünftige Generation von gasgekühlten Hochtemperatur-Kernreaktoren untersucht. ODS-Stähle könnten andere Hochtemperatur-Materialien für Rohrleitungen oder Strukturteile ersetzen. Dieser Werkstoff muss deshalb imstande sein, extreme Betriebsbedingungen (Temperatur, strahlendes Umfeld) auszuhalten. Das quantitative Verständnis möglicher Schädigungen beim Einsatz ist ein Muss für einen sicheren Betrieb. Eine Schlüsselfrage ist das Verhalten des Materials unter Bestrahlung. Dies kann durch Analyse des strahlungsbedingten Anschwellens und Bestimmung lokaler mechanischer Eigenschaften der bestrahlten Oberfläche untersucht werden.

Im vorliegenden Fall findet die Bestrahlung am Tandem-Beschleuniger der ETH Zürich statt. Helium-Ionen von 1.5 MeV werden bei einer totalen Fluenz von $1.4 \cdot 10^{16}$ bis $1.1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ implantiert. Bei jeder Implantation wird der Strahleinfallwinkel von 0° zu 66° variiert, um ein konstantes Schädigungsprofil in der Probe zu erreichen (Tiefen von 0.5 bis 2.5 μm). Mit Hilfe einer Streifenmaske (400 Maschen) wird ein Muster von bestrahlten und unbestrahlten Streifen erzeugt. Die strahlungsinduzierte senkrechte Oberflächenversetzung wird anschliessend mit Atomkraft-Mikroskopie (AFM) untersucht, und die Schwellung für die verschiedenen Bestrahlungsfluenzen wird davon abgeleitet.



Figur 7: Indenter-Dellen in unbestrahlten und bestrahlten Regionen einer ODS-Probe.

Für eine entsprechende Versetzungsschädigung von 1 dpa wurde eine Schwellung von 4% gefunden. Dieser eher grosse Wert kann durch das hohe He/dpa-Verhältnis in diesem Experiment erklärt werden und stellt einen Extremfall dar, der in einem schnellen Neutronenspektrum auftreten könnte. Anschliessend wurde die Härte mit einem Nanoindenter getestet. Es wurde eine klare Erhöhung der Härte in den bestrahlten Regionen fest-

gestellt. Für eine Versetzungsschädigung von 0.7 dpa, stieg die Härte um 25%. Figur 7 zeigt eine Indenter-Delle gemessen mit dem AFM. Die Anhäufung am Dellenrand konnte nur auf bestrahlten Oberflächen beobachtet werden. Das quantitative Verständnis der Verformung soll durch Untersuchung der Dellenform und Vergleich mit Finite-Element-Simulationen verbessert werden.

ALPHA [9]: Das Projekt ist derzeit stark auf das internationale Programm SETH der OECD/ NEA ausgerichtet, woher auch ein grosser Teil seiner Finanzierung kommt. Im Berichtsjahr wurde, nach umfangreichen Anlagenmodifikationen und der Implementierung von fortgeschrittener Instrumentierung das experimentelle Programm in der *PANDA*-Versuchsanlage erfolgreich gestartet. Andere Hauptaktivitäten des *ALPHA*-Projektes bezogen sich auf den Abschluss mehrerer Projekte innerhalb des 5. EU Rahmenprogrammes. Eines dieser Projekte befasst sich mit der wichtigen Frage der Borvermischungs-Phänomene in Druckwasserreaktoren (DWR).

Im primären Kühlwasser heutiger *DWR* ist Borsäure gelöst, um die Kernreaktivität während des Betriebes und im abgeschalteten Zustand zu kontrollieren. In gewissen Situationen könnte aber eine signifikante Menge ganz oder teilweise deborierten Wassers im Primärkreislauf vorhanden sein, und es muss sichergestellt werden, dass sich dieses Wasser mit dem ausreichend borierten Kühlmittel genügend durchmischt, bevor es den Reaktorkern erreicht, um eine unerwünschte Reaktivitätsexkursion zu vermeiden.

Das Projekt *FLOMIX-R* im FWP5 zur Untersuchung solcher Vermischungsphänomene wird derzeit abgeschlossen. Ziel des Projektes war, 3-D Simulationen einer Reihe von Experimenten mit Computational Fluid Dynamics (CFD) Codes durchzuführen. Dabei wurden die Vermischungsaspekte sowohl von skalierten Reaktormodellen als auch von solchen natürlicher Grösse abgedeckt, und die Genauigkeit der Simulation anhand der Borkonzentration und der Strömungsgeschwindigkeiten überprüft.

Das PSI leistete Beiträge zu *FLOMIX-R* mit der Simulation des stationären und transienten Teils des Experiments *VATT 02*, welches in einem 1/5-Modell eines Westinghouse-DWR von Vattenfall Utveckling, Schweden durchgeführt wurde. Dazu wurde der *CFD* Code *CFX 5* eingesetzt, und die Resultate wurden mit dem Experiment und mit analogen Simulationen des *CFD*-Codes *Fluent* verglichen. Die Berechnung solcher Transienten erfordert signifikante Mengen an Rechenleistung und deshalb wurde das *MERLIN* Linux Cluster des

PSI über eine Periode von mehr als fünf Monaten genutzt, um vorhandene Rechenleistung im Labor für Thermohydraulik zu ergänzen.

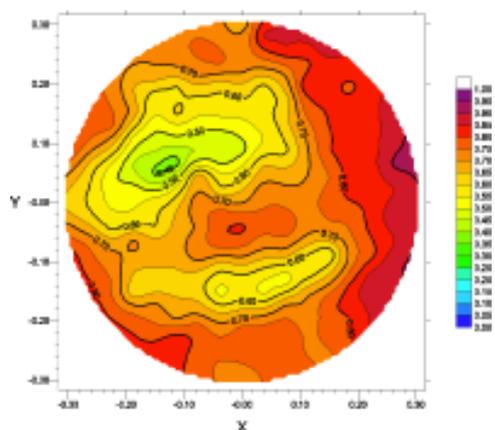
Um die Gültigkeit einer *CFD*-Simulation nachzuweisen, müssen Modellierungseffekte entweder minimiert oder eliminiert werden, und dies sowohl bezüglich des Finite-Elemente-Netzes zur Darstellung der physikalischen Struktur, als auch bezüglich der benutzten mathematischen Modelle und Techniken. Dazu wurde eine Parameterstudie für verschiedene Finite-Elemente-Netze, Turbulenzmodelle und Diskretisierungsschemata für das numerische Lösungsverfahren durchgeführt.

Im stationären Teil von *VATT 02* (ohne Vermischungsphänomene) war das Ziel aufzuzeigen, wie präzise *CFD* die Strömungsverteilung im annulusförmigen Teil mit Abwärtsströmung und unterhalb des Kerneintrittes wiedergeben kann. Es wurde gezeigt, dass man Advektionsschemata höherer Ordnung braucht, um das Geschwindigkeitsfeld genügend aufzulösen und grössere Strukturen in die Strömung wiederzugeben. Ebenso müssen die Turbulenzmodelle und das Maschengitter weiter optimiert werden.

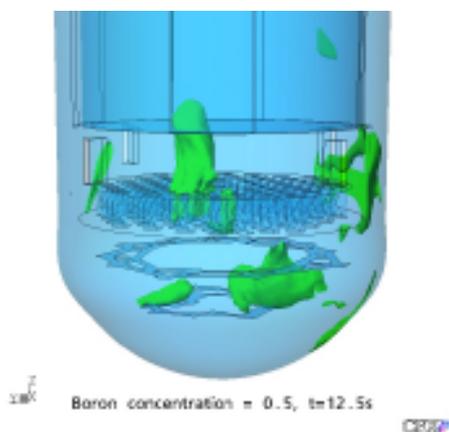
Die vom PSI mit *CFX 5* berechneten transienten Borkonzentrationsprofile am Kerneintritt stimmen mit den experimentellen Resultaten besser überein als jene von *Fluent*. Die qualitative und quantitative Übereinstimmung mit dem Experiment ist ein wesentlicher Fortschritt gegenüber einem früheren Benchmark, welcher von der Universität von Maryland durchgeführt wurde. Die vorausgesagten räumlichen und zeitlichen Verteilungen stimmen noch nicht perfekt mit dem Experiment überein, aber die Resultate weisen auf die noch notwendigen detaillierten Studien hin.

FAST [10]: Das Projekt *FAST* (Fast-Spectrum Advanced Systems for Power Production and Resource management) startete im Januar 2004 mit dem Ziel, einmalige analytische und rechnerische Fähigkeiten für Kern- und Sicherheitsanalysen von Systemen mit schnellem Neutronenspektrum aufzubauen, wobei anfänglich das Schwergewicht auf gasgekühlten schnellen Reaktoren liegt.

Im Rahmen der *Preliminary Design Study of an Experimental Accelerator Driven System (PDS-XADS)*, eines Projektes des 5. EU-Rahmenprogrammes, konzentrierte sich ein Teil der PSI-Untersuchungen auf vergleichende statische Neutronikanalysen zweier unterkritischer Systeme von 80 MW_{th} gekühlt mit einem Blei-Wismut-Eutektikum (LBE) bzw. mit Helium (GC). Die Analysen wurden mit dem Code *ERANOS* (Version 2.0) durchgeführt, einem deterministischen Codesystem für schnelle Reaktoren, der vom französischen CEA



Figur 8a: Relative Borkonzentration über der Kerneintritt-Ebene, wenn die Konzentration ihr Minimum erreicht.



Figur 8b: Iso-Flächen der relativen Borkonzentration, wenn die Flüssigkeit mit der niedrigsten Konzentration in den Kern eintritt.

in Zusammenarbeit mit anderen Organisationen entwickelt wurde. Die Kerne der zwei untersuchten Systeme bestehen aus dem gleichen repräsentativen Brennstoff mit der isotopischen Zusammensetzung des höher angereicherten MOX-Brennstoffes (23.25% Pu) aus dem zweiten Superphénix-Kern.

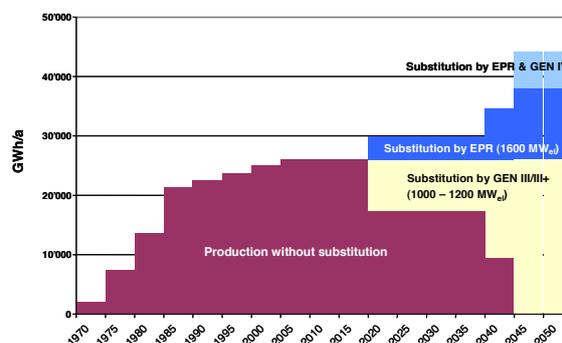
Die Merkmale der zwei Systeme können mittels des Quelleneinflusses (ϕ^*) zusammengefasst werden, welcher ein Mass für das relative Gewicht der in der Spallationsquelle erzeugten Neutronen im Vergleich zu jenen aus der Spaltung ist. Unter Annahme eines Betriebes mit einmaliger Beladung, war der Abbrand bei Entladung ~ 20 MWd/kg für den GC- und ~ 25 MWd/kg für den LBE-XADS. Der grössere Quelleneinfluss des GC XADS (~ 1.20 vs. ~ 0.98 ,) stellt sicher, dass diese zwei Werte relative nahe liegen, trotz des negativeren Reaktivitätsniveaus des GC XADS in seiner ursprünglichen Auslegung (0.95 vs. 0.97 für LBE). Dieser grössere

Quelleneinfluss und der kleinere Leistungsspitzenfaktor, der im Bündelring neben dem Target auftritt, sind das Resultat des schnellen Spektrums rund um das Spallationstarget, das im gasgekühlten Konzept neutronisch *weniger dicht* ist.

GANZHEITLICHE BETRACHTUNG VON ENERGIESYSTEMEN

GaBE [11]: Die Arbeiten zur Entwicklung interdisziplinärer Methoden und Anwendungen für Kunden im In- und Ausland wurden im Rahmen des GaBE-Projektes fortgesetzt. Unter anderen Aktivitäten hat GaBE mit Beiträgen sowohl vom NES als auch vom ENE eine Studie für das Bundesamt für Energie (BFE) durchgeführt zu Potenzialen und Kosten der Stromerzeugung mittels neuer Kerntechniken durchgeführt. Diese Arbeit ist Teil der laufenden BFE-Anstrengungen zur Aufdatierung der Schweizer Energieszenarien; der Zeithorizont liegt beim Jahr 2035, mit einer größeren Vision bis zum Jahr 2050.

Für die Kernenergie wurden Reaktoren der Generationen III / III+ und IV berücksichtigt, die in den bestehenden Schweizer Standorten ab den Jahren 2020 bzw. 2045 errichtet werden könnten. Figur 9 zeigt verschiedene Szenarien, die ihr Potenzial veranschaulichen. Im mittleren Szenario dient der *European Pressurised Reactor (EPR)* als Referenzkonzept für den Ersatz der heute im Betrieb stehenden Reaktoren ab etwa 2020. Diese Technologie ist heute verfügbar und zeigt ein noch höheres Sicherheitsniveau mit einer verstärkten Rolle der passiven Sicherheitsmerkmale. Konzepte der Generation IV mit Fortschritten hinsichtlich Ressourcennutzung, Abfallmengen, Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Proliferationsresistenz werden derzeit entwickelt. Man erwartet, dass sich diese Verbesserungen positiv auf die öffentliche Akzeptanz auswirken werden. Die geschätzten Gesteungskosten für die neuen Nukleartechniken sind im Bereich von 4-5 Rp. pro kWh_e.



Figur 9: Potenzielle Szenarien für die Kernenergie in der Schweiz

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/link_partners.html.

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Die Ziele aller Projekte wurden im Jahr 2004 erfüllt. Besonders hervorzuheben ist wiederum der erfolgreiche Abschluss mehrerer Projekte innerhalb des 5. EU-Rahmenprogrammes. Der Bericht der Plenaren Forschungskommission des PSI hat die strategischen Absichten des NES in ihrem Prinzip gutgeheissen und wertvolle Empfehlungen für die neu gestarteten Aktivitäten formuliert.

Mit dem Wechsel in der Bereichsleitung des NES per 1. April 2004 wurde das Forschungsprogramm im Detail begutachtet und im Grossen und Ganzen in seiner Ausrichtung und Umfang bestätigt. Dennoch wurde beschlossen, mittelfristig den zukünftigen nuklearen Systemen erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken und die mit ihrer Entwicklung zusammenhängenden Änderungen in den notwendigen Fachkompetenzen (schnelle

Neutronenspektren, neue Kühlmittel, neue Werkstoffe) rechtzeitig einzuleiten. Die strategische Planung des NES wurde anlässlich der periodischen Präsentation des Programmes *Nukleare Sicherheit und Entsorgung* vor der CORE im November 2004 präsentiert und von dieser gutgeheissen.

Das Jahr 2005 wird die Konsolidierung der neuen Forschungsaktivitäten, sowie den Beginn neuer EU-Projekte sehen, an welchen sich der NES beteiligt: *NURESIM*, *EXTREMAT*, *VHTR*, *GCFR*, *FUNMIG*. Die Strategische Planung des NES wird mit jenen der HSK und der Elektrizitätswirtschaft (*swissnuclear*) abgestimmt. Schliesslich wird im 2005 mit dem Einreichen des Sicherheitskonzeptes an die HSK die Umbau- und Nachrüstungsphase für die *PROTEUS*-Anlage initiiert.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

Die Jahresberichte werden auch im Scientific Report 2004 Volume IV des PSI erscheinen (zu bestellen bei: PSI, CH-5332 Villigen, oder <http://nes.web.psi.ch>).

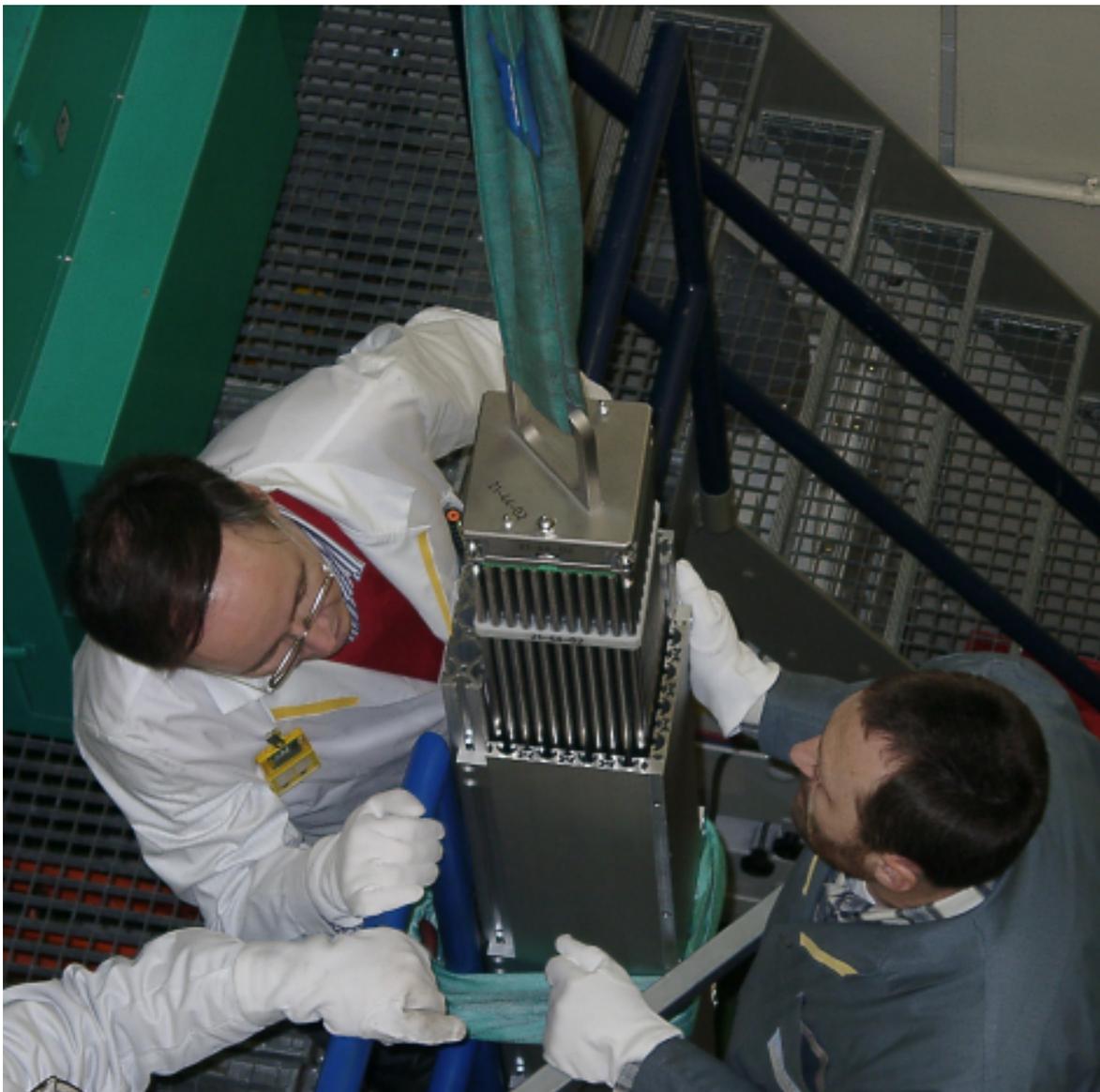
- [1] M. A. Zimmermann, (martin.zimmermann@psi.ch), PSI, Villigen, **STARS**, <http://stars.web.psi.ch>, (JB)
- [2] V. N. Dang (vinh.dang@psi.ch), PSI, Villigen, **HRA**, <http://systemsweb.psi.ch/hra>, (JB)
- [3] F. Jatuff, (fabian.jatuff@psi.ch), PSI, Villigen, **LWR-PROTEUS**; <http://proteus.web.psi.ch>, (JB)
- [4] Ch. Hellwig (christian.hellwig@psi.ch), PSI, Villigen, **CMB**, <http://www.web.psi.ch/eden0.htm>, (JB)
- [5] D. Kalkhof, (dietmar.kalkhof@psi.ch), PSI, Villigen, **INTEGER**, <http://www.web.psi.ch/lwv.htm> (JB)
- [6] S. Güntay, (salih.guentay@psi.ch) PSI, Villigen, **Forschung zu schweren Unfällen**, <http://sacre.web.psi.ch>, (JB)
- [7] J. Hadermann (joerg.hadermann@psi.ch), PSI, Villigen, **Entsorgung radioaktiver Abfälle**, <http://les.web.psi.ch/groups/index.html>, (JB)
- [8] W. Höffelner (wolfgang.hoeffelner@psi.ch) PSI, Villigen, **Hochtemperaturmaterialien**, (JB)
- [9] M. Huggenberger, J. Dreier, F. de Cachard (max.huggenberger@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)

REGULATORISCHE SICHERHEITSFORSCHUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Brigitte Faust

brigitte.faust@hsk.ch



Forschungsreaktor Proteus

Der Forschungsreaktor Proteus wird mit einem Test-Brennelement beladen.

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 der nuklearen Aufsicht verfügbar zu machen. Mit Hilfe des Strategiepapiers für die *Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK* wurden klare Prioritäten gesetzt, um den wirkungsvollen Einsatz der Mittel für nationale Projekte und internationale Kooperationen sicherzustellen und eine intensive Zusammenarbeit der betroffenen Akteure einzuleiten. So erzielt die HSK mit dem ihr zur Verfügung stehenden Geld nicht nur international abgesicherte Ergebnisse und fundiertes Fachwissen, sondern kann Synergien nutzen. Besonders wichtig ist der Erfahrungsaustausch mit ausländischen Sicherheitsbehörden sowie Kosteneffizienz und mittelfristige Planungssicherheit für die Forschungspartner.

Die neue Gesetzgebung (Kernenergiegesetz KEG und Kernenergieverordnung KEV) hat für die Neuausrichtung der Ressortforschung eine zentrale Bedeutung. Sie fordert keine befristeten Bewilligungen für Kernanlagen mehr, sondern legt fest, dass das bestehende hohe Sicherheitsniveau während der gesamten Betriebsdauer laufend überwacht und ausgebaut werden muss, ungeachtet der Länge der tatsächlichen Betriebszeiten. Obwohl keine Restbetriebszeiten festgelegt sind, wird die Stilllegung der heute bestehenden Kernanlagen in absehbarer Zeit erfolgen.

Die HSK muss in diesem Umfeld das Alterungsverhalten der schweizerischen Kernanlagen bewerten, die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben für den Betrieb überwachen und die Stilllegung begleiten. Insbesondere die Festlegung des Zeitpunktes der Ausserbetriebnahme und der Umgang mit Sicherheitsfragen und Investitionen während den letzten Betriebsjahren werden die HSK in Zukunft vermehrt beschäftigen. Aufgrund dieser Herausforderungen setzt die HSK in folgenden Themenbereichen Forschungsschwerpunkte fest:

- **Werkstoffforschung:** Der Reaktordruckbehälter und das Containment eines bestehenden Kernkraftwerks können nicht ausgetauscht werden. Ihr Zustand stellt deshalb den wichtigsten limitierenden Faktor für die Gesamtlebensdauer des Kraftwerkes dar. Zur Unterstützung der Aufsicht im Bereich der Integrität des Primärkreislaufes und der Rückhaltefähigkeit des Containments benötigt die HSK wissen-

schaftliche Untersuchungen auf den Gebieten Werkstoffverhalten und Früherkennung von Alterungserscheinungen.

- **Zusammenwirken von Mensch, Organisation und Technik (MTO):** Die Sicherheit einer Kernanlage ist gleichzeitig an menschliche, organisatorische und technische Voraussetzungen gebunden. Deshalb ist es der HSK im Rahmen einer integrierten Aufsichtsstrategie wichtig, Kernanlagen als MTO-Systeme zu betrachten und neben den technischen Sicherheitsvoraussetzungen auch den menschlichen und organisatorischen Faktoren die erforderliche Aufmerksamkeit zu schenken. Die Schwierigkeit bei der Aufsicht auf diesem Gebiet besteht darin, dass nur wenige harte Anforderungen und klare Bewertungsmaßstäbe existieren. Wissenschaftliche Studien können dazu dienen, solche Anforderungen und Bewertungsmaßstäbe zu erarbeiten.
- **Kriterien für die vorläufige Ausserbetriebnahme und Nachrüstung:** Ein Entscheid der Aufsichtsbehörden zur vorläufigen Ausserbetriebnahme und Nachrüstung einer Kernanlage muss sich auf klare, nachvollziehbare Kriterien abstützen. Diese Kriterien sind gesetzlich verankert. Der Forschungsbedarf besteht darin, diese zu definieren.

Hinzu kommen Fragestellungen im Zusammenhang mit der Entsorgung der radioaktiven Abfälle. Das UVEK hat sich das strategische Ziel gesetzt, für die Entsorgung politisch und technisch tragfähige Lösungen zu suchen. Die Aufgabe der HSK in diesem Prozess besteht darin, die vorgeschlagenen Lösungen auf ihre Sicherheit und Nachhaltigkeit zu bewerten. Dazu müssen die für die Projektbeurteilungen benötigten Methoden zur für Sicherheits- und Szenarienanalyse weiterentwickelt und verfeinert werden.

In der Vergangenheit wurde die Forschung im Entsorgungsbereich hauptsächlich durch die Industrie finanziert. Der Bedarf nach Untersuchungen und Abklärungen seitens der öffentlichen Hand ist neu und in den bisherigen Budgets nicht enthalten. Die Frage der Finanzierung bzw. des Umfangs der staatlichen Beteiligung wird zurzeit im Rahmen der Ausarbeitung der Entsorgungsstrategie vom BFE überprüft.

Um die zukünftigen Anforderungen der nuklearen Aufsicht möglichst vollständig abzudecken, setzt sich die HSK zum Ziel, die Effizienz, Wirksamkeit, Ausgewogenheit und Nachvollziehbarkeit ihrer

Arbeitsweise zu steigern. Die HSK befasst sich daher seit längerer Zeit mit neuen risiko- und ergebnisorientierten Aufsichtsansätzen und beteiligt

sich an internationalen Arbeitsgruppen zu diesen Fragestellungen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

REAKTORSICHERHEIT

Im Forschungsprojekt **RIKORR II – Rissskorrosion in druckführenden ferritischen Komponenten des Primärkreislaufs von Siedewasserreaktoren** [1] wird das Rissskorrosionsverhalten von niedrig legierten Reaktordruckbehälter (RDB)-Stählen (unbeeinflusster Grundwerkstoff und Wärmeeinflusszonen) und von RDB-Schweissgutwerkstoffen unter transienten sowie stationären Siedewasserreaktor(SWR)-Betriebsbedingungen bei Normalwasserchemie(NWC)- und Wasserstoffchemie(HWC)-Fahrweise experimentell untersucht.

Die Konservativität der BWR VIP-60 Spannungsrissskorrosion (SpRK)- und ASME XI Ermüdungsrissswachstumskurven für niedrig legierte RDB-Stähle wurde in diesen Experimenten über einen weiten Bereich von SWR/NWC-Bedingungen bestätigt. Jedoch konnten auch einige kritische Kombinationen von Umgebungs-, Belastungs- und Materialparametern identifiziert werden, bei denen Korrosionsrisse schneller wachsen, als zuvor angenommen. Erste Untersuchungen mit Wasserstoffeinspeisung unter simulierten HWC-

Bedingungen führten unter diesen kritischen Systembedingungen immer zu einer signifikanten Verlangsamung des Korrosionsrissswachstums um mindestens eine Größenordnung. Die Rissswachstumsraten fielen wenige Stunden nach dem Übergang zu HWC-Bedingungen unter die entsprechenden BWR VIP-60 SpRK- und ASME XI Ermüdungsrissswachstumskurven. Die Experimente des internationalen Ringversuches mit kaltverformten Inconel-600 unter SWR- und DWR-Bedingungen zur Überprüfung der Versuchseinrichtungen sind erfolgreich abgeschlossen und haben trotz des inhomogenen Gefüges und der zum Teil starken Beeinflussung des lokalen Rissswachstums durch Oxideinschlüsse vergleichbare Ergebnisse mit Rissswachstumsraten im erwarteten Bereich geliefert. Im nächsten Schritt kann deshalb nun bei allen Projektpartnern das SpRK-Rissswachstum im Inconel-182-Schweissgut einer Inconel-600/Inconel-182-Mischnaht untersucht werden.

Diagnostik soll Methoden zur Früherkennung von Materialermüdung in Rohrleitungen aus nicht rostenden austenitischen Stählen unter der Nutzung des Effektes der deformationsinduzierten Martensitbildung entwickeln. Im Projekt **Diagnostik** [2] werden die wichtigsten Einflussgrößen auf die Martensitbildung, wie Lastamplitude (Dehnung), Temperatur, Schwingspielzahl, Erschöpfungsgrad sowie auch Material und Materialzustand untersucht sowie Möglichkeiten zur Detektion des Martensitgehaltes mit magnetischen Methoden aufgezeigt. Im Berichtszeitraum 2004 wurde das Ermüdungsverhalten des Rohrleitungsmaterials X6CrNiTi18-10 (W.-Nr. 1.4541, AISI 321) umfassend gemessen und die mechanischen, magnetischen und mikrostrukturellen Eigenschaften untersucht. Die Ergebnisse wurden mit früheren Messungen an Stangen- und Platten-Material verglichen. Insbesondere wurden die Bedingungen für eine Anfälligkeit gegenüber der deformationsinduzierten Martensitbildung aufgezeigt. Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich der Effekt der deformationsinduzierten Martensitbildung zur Lebensdauerbestimmung gut eignet, wenn dieser beim vorliegenden Materialzustand auftritt sowie Angaben zum Materialzustand und den Belastungen an den Komponenten vorliegen (chemische Zusammensetzung, Temperaturmes-

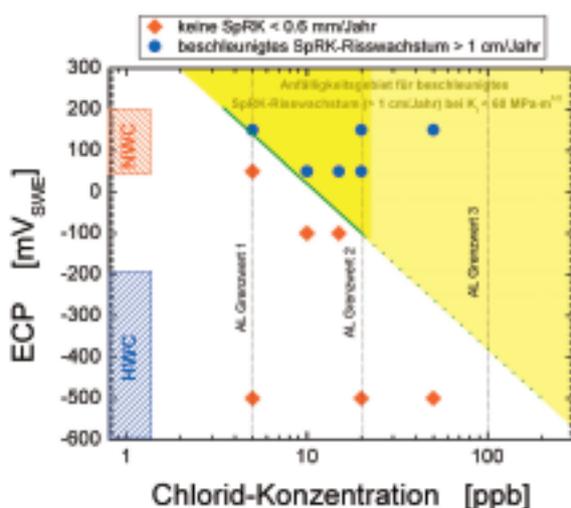


Bild 1: Anfälligkeitsbedingungen (kritische Kombinationen von Korrosionspotential und Chlorid-Konzentration) für das Auftreten von beschleunigtem SpRK-Rissswachstum in ferritischen RDB-Stählen im Vergleich zu typischen Wasserchemiebedingungen (schraffiert) im stationären SWR/NWC- bzw. HWC-Leistungsbetrieb.

sungen). Bereits relativ klein erscheinende Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung und in der Mikrostruktur der Reaktorstähle können zu sehr unterschiedlichem Ermüdungsverhalten führen. Wesentliche, zerstörungsfrei gemessene Materialeigenschaften an den Anlagen müssen daher genau erfasst und dokumentiert werden, um den Materialzustand bewerten und die Lebensdaueranalyse weiter verbessern zu können.

Das Projekt **STARS – Sicherheitsforschung bezüglich Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz** [3] dient der Unterstützung deterministischer Sicherheitsanalysen in Bezug auf das Brennstoff- und Abbrandverhalten. Auf der Basis der Nachrechnung von mehr als 100 kritischen Konfigurationen aus dem *International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments* wurde die rechnerische Marge ermittelt, die bei der Benutzung des Monte-Carlo Codes MCNXP für die Kritikalitäts-Sicherheitsanalyse angewandt werden muss.

TRACE, der neue Systemcode der US NRC, wurde mit unterschiedlichem Erfolg für verschiedene Studien eingesetzt. Mit der Nachrechnung einer grossen Anzahl von Critical Heat Flux (CHF)-Experimenten wurden gute Resultate erzielt, wie auch mit der Nachrechnung des LOFT L-2-5 LOCA-Experimentes, das im Rahmen der PSI-Beteiligung im PSI BEMUSE-Programm erarbeitet wurde. Das verallgemeinerte Strahlungsmodell, eine Voraussetzung für die Analyse der geplanten Halden LOCA-Experimente mit hoch abgebranntem Brennstoff, funktioniert ebenfalls.

Mit der vergleichenden Analyse von ausgewählten RIA-Experimenten des CABRI-Projektes unter Benutzung der beiden transienten Brennstab-Codes FALCON und SCANAIR wurde die Fähigkeit zur Analyse des Brennstabverhaltens demonstriert und damit ein weiterer wichtiger Meilenstein erreicht. Die Anwendung von zwei Rechenprogrammen mit unterschiedlichen Modellansätzen erlaubte gleichzeitig die Einschätzung der relativen Wichtigkeit von verschiedenen Phänomenen, beispielsweise derjenigen des Spaltgas induzierten Brennstoffschwellens. Die nicht-parametrische Methodik für die Quantifizierung der Unsicherheiten der physikalischen Modelle von Systemcodes machte ebenfalls gute Fortschritte.

Das bis Ende 2004 laufende Projekt **NESC III** [4] dient der Charakterisierung mechanischer Eigenschaften von Stahl auch im Bereich von Schweissnähten, welche besonderer Aufmerksamkeit bedürfen. Da verschiedene Materialien (ferritisch-austenitische Stähle und Misch-Gefüge) gleichzeitig auftreten und Eigenspannungen nicht zu

vermeiden sind, ist dies schwierig. Das anhand experimenteller Daten und theoretischer Ergebnisse aufgezeigte Phänomen der *Tearing-Instabilität*, konnte bislang noch nicht eindeutig erklärt werden. Zum Thema Eigenspannungen konnten die Ergebnisse der kürzlich durchgeführten ergänzenden Messungen an einem Rohr aus dem *Bi-Metallic* (BIMET) -Projekt als repräsentativ bezeichnet werden. Die noch nicht ausgewerteten zusätzlichen Härte/Eindruckversuche *analysis of different metal welds* (ADIMEW) am Aussenmantel sollen demnächst abgeschlossen werden. Die Schweissnähte einschliesslich der Wärmeinflusszone (WEZ) weisen eine andere Festigkeit als das Basismaterial auf, wobei das Kaltverformungsvermögen die Bruchzähigkeit wesentlich beeinflusst.

Das seit 1958 von 18 Ländern getragene Gemeinschaftsprojekt *Nuclear Safety and Reliability - Fuels and Material* untersucht die Lebensdauer von unterschiedlichen Materialien für Kernkomponenten unter stationären und transienten Bedingungen. Im Rahmen des **OECD Halden Reactor Project – Fuels and Material** [5] hat man im Berichtszeitraum 16 Experimente durchgeführt, in denen keramische Brennstoffe (UO₂, MOX, inert Matrix) sowie Materialien mit hohen Neutronenfluenzen aus kommerziellen Leichtwasserreaktoren bezüglich ihres Verhaltens bei Hochabbrand untersucht werden. Typische Messgrössen sind Brennstofftemperatur, Spaltgasfreisetzung sowie Dimensionsänderungen von Brennstoff und Hüllrohr. Für das Inert-Matrix-Experiment hat das Paul Scherrer Institut den Brennstoff hergestellt, der dann planmässig weiterbestrahlt wurde, um damit strahleninduzierte Veränderungen zu untersuchen. Eine wesentliche Rolle spielten dabei die früheren Experimente mit unbestrahltem Brennstoff.

Das **MSWI Project During Postulated Severe Accidents in LWRs** [6] befasste sich im Berichtszeitraum mit der Kühlbarkeit von Kernschmelzen innerhalb und ausserhalb des Reaktordruckbehälters (RDB), mit der Problematik bei Dampfexplosionen und mit der Modellierung von Transienten des schwedischen Siedewasserreaktors Oskasham 3 unter Verwendung der Simulationscodes RELAP+PARCS sowie TRACE+PARCS.

Bei den durchgeführten Experimenten wurde auf die Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf reale Bedingungen in einem Reaktor besonderen Wert gelegt. Ferner wurden die Experimente durch Computersimulationen begleitet. Die hierfür teilweise neu entwickelten Simulationsmodelle wurden anhand verfügbarer Messdaten validiert.

Verschiedene Programme wie *COMECO* (COrium MElt COolability, siehe Bild 2), *POMEKO* (POrous

MEDIA COolability) und *MISTEE* (Micro-Interactions in Steam Explosion Experiments) wurden 2004 fortgeführt. Die *SI-MECO* (Simulation of MELt COolability) Arbeiten wurden (nach einer Unterbrechung) wieder aufgenommen. Aufgrund finanzieller Probleme verzögerte sich der Aufbau der Versuchseinrichtung *POMECO-GRAND* (POrous MEDIA COolability). Alternativ wurde daher der bestehende Versuchsstand *POMECO* modifiziert, um dreidimensionale Effekte bei der Kühlung der Kernschmelze untersuchen zu können. Neben den *COMECO*-Experimenten mit oxidischer Hochtemperaturschmelze, den *POMECO*-Experimenten zu dreidimensionalen Effekten bei der Kühlung eines Schmelzebettes, den *SIMECO*-Experimenten zu dreischichtigen Schmelzepools und den *MISTEE*-Experimenten zur Dampfexplosion werden die mit dem *COMETA*-Code erzielten Ergebnisse bei der Simulation des Dampfexplosionsprozesses sowie die numerischen Arbeiten mit *RELAP+PARCS/TRACE+PARCS/ASTEC* und *MELCOR* beschrieben.

Das Projekt **Melt Coolability and Concrete Interaction (MCCI)** [7] wurde von den daran beteiligten Ländern Belgien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Japan, Korea, Norwegen, Schweden, Schweiz, Spanien, Tschechien, Ungarn und den USA im Januar 2002 in Angriff genommen und soll Ende 2005 abgeschlossen werden. Am Argonne National Laboratory (ANL) bei Chicago/USA wurden vier Versuchsreihen durchgeführt. Zum einen wurde verifiziert, dass geschmolzene und auf den Containmentboden ausgetretene Kernschmelze stabilisiert und von oben mit Wasser gekühlt werden kann. Weiter wurde die langfristige Wechselwirkung zwischen der Kernschmelze und dem Betonboden des Containments untersucht. Weitere Experimente sollen noch vorhandene Un-

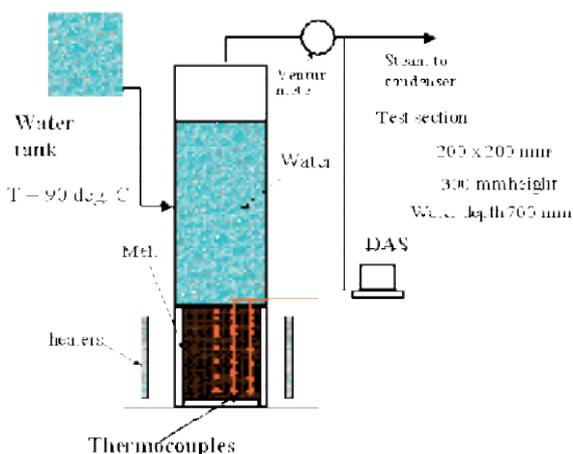


Bild 2: Versuchseinrichtung bei den *COMECO* Experimenten.

sicherheiten bezüglich des Unfallverlaufes in der ex-Vessel-Phase aktueller Computercodes verringern helfen. So können PSA-Studien der Stufe 2 und insbesondere die daraus abgeleiteten Severe Accident Management Guidelines optimiert werden, was zu einem weiteren Sicherheitsgewinn der Kernanlagen führt.

Im **OECD CABRI Water Loop Project** [8], [9], [10], sollen – in Zusammenarbeit zwischen OECD/NEA und dem *Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)* – in den Jahren 2007 – 2010 am Forschungsreaktor *CABRI* in Cadarache, Frankreich Versuche zum Hochabbrand-Verhalten von Brennstäben bei schnellen Reaktivitätsstörfällen durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wird der bisher mit Natrium gekühlte Testloop des *CABRI*-Reaktors auf Wasserkühlung umgestellt, so dass die Versuchsanordnung den in den Leichtwasserreaktoren vorhandenen Bedingungen besser entsprechen wird. Ein Ziel der Versuche ist es zu prüfen, ob die bisher bei der Analyse von Reaktivitätsstörfällen angewandten Sicherheitskriterien auch für höher abgebrannte Brennstäbe gültig sind, und, falls erforderlich, Grundlagen zur Herleitung verbesserter Sicherheitskriterien bereit zu stellen. Im Jahre 2004 wurde mit den Umbauarbeiten am *CABRI*-Reaktor begonnen. Für 6 der vorgesehenen Tests wurden die Testziele und die Testbrennstäbe, die zum Einsatz kommen sollen, festgelegt.

Das internationale Projekt **PHEBUS Fission Products Programme** [11] dient der Simulation von Abläufen bei schweren Unfällen. So werden am französischen Versuchsreaktor *Integrale* Experimente mit echtem Brennstoff durchgeführt, um Aussagen über das Verhalten von Kernschmelze, die Freisetzung von Spaltprodukten, die Validierung von Modellen für bestehende Quelltermcodes sowie über die Sicherheitsbewertung von Kernanlagen der jetzigen und zukünftigen Generation machen zu können. Durch laufende Verringerung der Parameter- und Modelunsicherheiten sowie durch gute Skalierung und Instrumentierung unter verschiedenen thermohydraulischen und physikalisch-chemischen Bedingungen wird gewährleistet, dass die erhaltenen Daten auf reale Unfallsituationen bzw. für die Notfallplanung angewendet werden können.

Eine Analyse der Versuchsergebnisse mit den derzeit verfügbaren Codes hat gezeigt, dass ein *best estimate approach* beim Modellieren des komplexen schweren-Unfall-Geschehens die Grundlage für eine belastbare Festlegung des zulässigen Quellterms darstellt. Noch verbleibende Unsicherheiten rechtfertigen auf jeden Fall, dass noch einiges an experimenteller und analytischer Arbeit

getan werden muss, um vorhandene Ressourcen sinnvoll einsetzen zu können.

KKW-Unfallsequenzen mit Kernschmelzen, Dampferzeuger-Heizrohrbruch und fehlerhafter Isolation des Dampferzeugers haben nach heutigem Kenntnisstand eine sehr kleine Eintretenswahrscheinlichkeit. Trotzdem, tragen sie aufgrund der ohne oder mit nur schwach wirksamen Abscheidemechanismen modellierten Freisetzung von radioaktiven Aerosolen in die Umgebung deutlich zum Risiko eines Kernkraftwerkes bei (Containment - Bypass - Sequenzen). Das **ARTIST**-Programm [12] wurde 2003 gestartet und soll bis 2007 abgeschlossen sein. Die ARTIST – Experimente werden von einem internationalen Forschungs-Konsortium unter Leitung des PSI durchgeführt und haben zum Ziel, Daten und Informationen über den Aerosoltransport durch die Dampferzeuger bei unterschiedlichen Störfallbedingungen zu erfassen und für die Modellentwicklung aufzubereiten. Als Konsequenz dieser Forschung können zum einen Empfehlungen für das Unfall-Management, zum anderen realistischere Modelle für die PSA-Studien entwickelt werden. Beides führt bei den betrachteten KKW-Unfallsequenzen zu einer Reduktion respektive besseren Einschätzung des Risikos. Mit Ausnahme der integralen Tests wurden für alle Telexperimente Messungen durchgeführt und analysiert, wobei die Resultate der Experimente teilweise zu Anpassungen am Experimentierplan geführt haben. Wesentliche Erkenntnisse sind, dass die im Experiment verwendeten Aerosole beim Übertritt von der Primär- auf die Sekundärseite aufbrechen und dass bei einer ausreichenden Wasservorlage auf der Sekundärseite eine effektive Aerosolrückhaltung erreicht werden kann.

Im Projekt **OECD-FIRE** [13] werden Daten zu Brandereignissen in Kernkraftwerken der OECD-Mitgliedstaaten gesammelt und analysiert. Da Brandereignisse in Kernkraftwerken sehr selten sind, ist ein Zusammenschluss auf internationaler Basis zwingend notwendig. 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 die werk-spezifischen Brandrisikoanalysen zu verbessern. In einer ersten, dreijährigen Projektphase (2003 – 2005) sollen die Datenbankstruktur und die zugehörige Dokumentation erstellt werden. Ferner sollen von jedem Mitgliedstaat die aktuellen und zehn historische Brandereignisse gesammelt werden. Im Berichtsjahr wurden in Bezug auf all diese Ziele deutliche Fortschritte erzielt. Eine vor-

läufige Version der Datenbank konnte an die Mitgliedstaaten abgegeben werden. Zudem wurden die Struktur der Datenbank noch besser auf die erwarteten Anwendungen abgestimmt und der Leitfaden zur Kodierung der Brandereignisse weiter verfeinert. Im Jahr 2005 soll hinsichtlich der zweiten Projektphase, die primär auf das kontinuierliche Sammeln der weiteren Daten ausgerichtet sein wird, eine neue Projektstruktur definiert werden.

Im Rahmen des Abkommens **Co-Operative Research Activities US-NRC & HSK** [14] zwischen der HSK und der amerikanischen Sicherheitsbehörde werden Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der probabilistischen Sicherheitsanalyse (Risikoinformierte Entscheidung und Betriebliche Einflussgrößen auf Risiko), des Alterungsmanagements und der Code-Entwicklung für das Unfallmanagement ausgetauscht. Ebenso wie die Nuklearindustrie international zusammenarbeitet, strebt auch die NRC eine Koordination und internationalen Konsens innerhalb der Regulierungsbehörden an.

Als für die Aufsicht bedeutend wurde das Verständnis der Schadensmechanismen und den einhergehenden Unsicherheiten gesehen. So wird z.B. vorgeschlagen, massgebliche Kriterien für das Versagen zu formulieren. Man spricht hier von *Agents of Failure* wie z.B. die Beziehung zwischen Spannungen und der Festigkeit, diejenige zwischen Schaden und Lebensdauer sowie diejenige zwischen Sicherheitsgewinn und behördlichen Forderungen. Die explizite Behandlung von Unsicherheiten ist nicht nur bei der Untersuchung der Ursache-Wirkungsbeziehungen von Schädigungsmechanismen wesentlich, sondern auch bei der Validierung von Rechencodes wie z.B. *MELCOR* (neue *MELCOR*-Version 1.8.6 im März 2005 verfügbar) und bei der risikoinformierten Entscheidungsfindung. Deshalb beabsichtigt die NRC innerhalb der nächsten Jahre, den Reg. Guide 1.174 zur Behandlung von Modell-Unsicherheiten zu aktualisieren.

STRAHLENSCHUTZ

Im Projekt **Aeroradiometrie 3** [15] werden die radioaktive Strahlenquellen am Boden durch Messungen aus der Luft z.B. mit Hilfe eines Helikopters erfasst. Im Jahre 2004 wurde das Messsystem erneuert und dabei die online Auswertungssoftware im Messsystem integriert. Zudem wurde die Datenakquisitionssoftware erneuert. Eine erste kurze Einführung der Benutzer erfolgte im Rahmen der jährlichen Messübung am Boden, da das erneuerte Messsystem noch nicht abgenommen und

damit noch nicht für den Einsatz im *Super Puma* zugelassen war. Neben der Berichterstattung in *Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz*, herausgegeben vom Bundesamt für Gesundheit (BAG), wurde auch ein wissenschaftlicher Bericht zu den Messungen im Rahmen der Übung *UARM03* erstellt.

Für einen Einsatz im Auftrag der Nationalen Alarmzentrale (NAZ) und des BAG wurde die Aeroradiometrieausrüstung zum ersten Mal für eine Quellensuche in einem Auto montiert und betrieben. Der Einsatz demonstrierte die Möglichkeiten von grossvolumigen Gammaskpektrometern am Boden und zeigte auch noch Optimierungspotential auf. Bei den jährlichen Messflügen und einer zusätzlichen Übung konnte ein weiteres Mal das Potential der Aeroradiometrieausrüstung bei Quellensuchen demonstriert werden. Vergleiche mit Bodenmessungen zeigten eine gute Übereinstimmung. Da sich aber die Gesichtsfelder der verglichenen Methoden stark unterscheiden, müssen in Zukunft breiter abgestützte Bodenmessungen durchgeführt werden. Bei der Archivierung der aeroradiometrischen Daten wurden dieses Jahr die Rohdaten der Jahre 1994 bis 2004 in die neu erstellte Datenbank eingelesen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes **Zusammenarbeit in der Dosimetrie** [16] wurden durch die Teilnahme am EU-Projekt EVIDOS im Berichtsjahr wertvolle Erkenntnisse über die Neutronendosimetrie gewonnen. Die verfügbaren Informationen über dieses komplexe Teilgebiet der Dosimetrie können somit auf dem neuesten Stand der Wissenschaft und Technik gebracht werden. Ein wesentlicher Meilenstein konnte hinsichtlich der Einrichtung eines Kompetenzzentrums an der Sektion Messwesen des PSI für die Überprüfung von Raum- und Abluftanlagen erreicht werden. Ziel ist die Bestimmung von Aerosolverlusten in komplexen Leitungssystemen. Mit der Entwicklung einer reproduzierbaren Adsorptionsmethodik für das Tracergas SF₆ gesetzt werden. Erfahrungen mit der Umsetzung der HSK-Richtlinie R-13 wurden wiederum bezüglich der Freimessmethodik gemacht. Fortschritte in der Kalibriertechnik und vertiefte Erkenntnisse in die Funktionsweise der eingesetzten Freimessanlage erhöhen die Qualität weiterer Freimesskampagnen im Zusammenhang mit Rückbauten des PSI und stärken das Vertrauen in die maschinelle Freimesstechnik.

Bei der **Zusammenarbeit in der Radioanalytik** [17] wurden Berichtsjahr ein Ge-Detektor für weiche Photonenstrahlung kalibriert und Software zur Berechnung von Probengeometrien, Absorptionsverlusten und Koinzidenzeffekten implementiert. Weiter konnten eine Analysenmethode für

die Trennung zwischen Cr, Fe, Ni und Co in Stahlkomponenten entwickelt und wasserchemische Inhaltsstoffe in Bezug auf Korrosionsprodukte und -prozesse in Kernreaktoren untersucht werden.

Im Rahmen von nationalen und internationalen Kooperationen zur Inkorporationsüberwachung erfolgten Vergleichsmessungen für U und Th in Urin (BSF-Berlin), Tritium in Urin (Suva-Luzern), U, Pu und Am in Stuhlaschen (PROCORAD-CEA-Paris) sowie für Tritium, Sr 90 und γ -Strahler in Urin (PROCORAD-CEA-Paris). Des Weiteren wurde von der Sektion Messwesen des PSI ein Ringversuch für die Bestimmung von Jod 131 und Jod 125 in einem Schilddrüsenphantom initiiert, bei dem alle Teilnehmer (d.h. anerkannte Dosimetrie-Messstellen) erfolgreich abschnitten. Bei weiteren Ringversuchen wurden α -Strahler in Bodenproben (Veranstalter: IRA Lausanne) und in Reaktorwasserproben (BFS-Berlin) gemessen. Bei den reinen β -Strahlern gab es wie im Vorjahr C 14 - Quer- und Längsvergleiche zwischen der Universität Bern (Physikalisches Institut) und dem PSI an Baumblättern von verschiedenen Standorten. Bei fast allen Vergleichsmessungen lässt sich eine gute Übereinstimmung der PSI-Resultate mit den Sollwerten feststellen.

Bei einer Strahlentherapie soll das Tumorgewebe möglichst effizient geschädigt, das umliegende gesunde Gewebe aber möglichst geschont werden. Im Projekt **Angiogenesis -Evaluation einer kombinierten Therapie mit tumorvaskulaturspezifischen Reagentien und ionisierender Strahlung** [18] wurden grundlegende Experimente durchgeführt, um Reagenzien mit der Hilfe von Liposomen (biologische Mikrokugeln mit einer Hülle aus Lipid-Doppelmembranen) spezifisch in ein Zielgewebe zu transportieren. Erst im Zielgewebe sollen die Reagenzien ihre Wirkung entfalten, diese kann direkt zellschädigend sein oder aber auch die Wirkung einer zusätzlich eingesetzten Bestrahlung erhöhen können. Um die Liposomen auf ein bestimmtes Zielgewebe (Tumorgewebe oder dessen versorgende Gefässe) zu *dressieren*, werden Antikörper in die Membranen eingebaut, die bestimmte Oberflächenmoleküle erkennen, welche nur oder vorwiegend im Zielgewebe vorkommen. Es konnten Antikörper isoliert und so in die Liposomen-Vehikel eingebaut werden, dass der Ablauf drastisch beschleunigt wurde. Die Liposomen mit ihren zellschädigenden Inhaltsstoffen können auf diese Art schnell und spezifisch Gefässe angreifen, die den Tumor mit Nährstoffen versorgen. In einem weiteren Schritt können die Liposomen mit Radionukliden oder mit Stoffen beladen werden, die die Strahlenwirkung erhöhen.

Es ist denkbar, die Effizienz einer Strahlentherapie zu erhöhen, indem man mit molekularbiologischen Methoden die Strahlenempfindlichkeit der Tumorzellen erhöht. Gene, deren Produkte die gewünschten Zielzellen schädigen oder abtöten, werden so modifiziert, dass sie erst bei Bestrahlung mit klinischen Dosen aktiv werden. Dazu musste im Rahmen von **Molekularbiologische Untersuchungen zur zellulären Radiosensitivität** [19] zuerst nach Genen gesucht werden, die sich durch ionisierende Strahlung aktivieren lassen. Es konnten Gene identifiziert werden, deren Eiweiss-Produkte bereits früh nach der Bestrahlung verändert wurden (posttranslationelle Modifikationen). Zudem gibt es Gene, die ihre Aktivität bei hohen Dosen, fraktioniert oder akut abgegeben, signifikant erhöhten. Es kann nun begonnen werden, die Promotoren (diejenigen Teile dieser Gene, die für die strahlenabhängige Erhöhung der Genaktivität verantwortlich sind) an Gene zu koppeln, die zellschädigende Produkte liefern. Dies würde eine kombinierte, tumorspezifische Radiotherapie ermöglichen.

UMGANG MIT RADIOAKTIVEN ABFÄLLEN, STILLLEGUNG UND ENTSORGUNG

Im **Felslabor Mont Terri** [20] werden im Rahmen eines internationalen Forschungsprojektes Untersuchungen durchgeführt, um jene geologische, hydraulische, hydrochemische und felsmechanische Eigenschaften des Opalinuston zu erfassen,



Bild 3: Felslabor Mont Terri – Nische des Heater-Experimentes, das hauptsächlich zur praktischen Überprüfung von Rechenmodellen dient (Comet).

welche für die Beurteilung der Sicherheit und die Abklärung der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers in diesem Gestein massgebend sind. Das Projekt umfasst heute 12 Partner aus 6 Ländern (Schweiz, Frankreich, Deutschland, Spanien, Belgien und Japan), wobei die HSK seit Sommer 2003 am Projekt teilnimmt. Die HSK kann so die von ihr und ihren Experten entwickelten Modelle und Rechenwerkzeuge, welche bei der Überprüfung des Entsorgungsnachweises im Opalinuston eingesetzt werden, an konkreten Datensätzen des Felslabors validieren oder eigene Experimente vornehmen. Das Projekt bietet eine wichtige Plattform, um sich über den Stand der internationalen Forschungsarbeiten in Tongestein zu informieren.

In der Berichtsperiode hat die HSK in Zusammenarbeit mit der Ingenieurgeologie der ETH-Zürich, welche die HSK im Rahmen eines Allianzvertrages bei ihren Arbeiten unterstützt, das Experiment *Mechanical Heterogeneities and Fracture Generation in the EDZ* in Angriff genommen. Ziel des Experimentes ist die Charakterisierung und Modellierung der Kluftbildung in der Auflockerungszone (EDZ), die beim Ausbruch eines Stollens infolge der Spannungsumlagerungen im Tongestein entsteht. Das in der Auflockerungszone gebildete Kluftnetzwerk führt zu einer Erhöhung der Durchlässigkeit und somit zu präferentiellen Fließpfaden, welche die Sicherheit eines Endlagers beeinflussen können. Die Entstehung und Fortpflanzung diskreter Klüfte in der EDZ sollen mit diesem Experiment untersucht und numerisch simuliert werden.

Die Grösse der Auflockerungszone um einen Stollen ist abhängig von der Beschaffenheit und den Materialeigenschaften des Gesteins, den in situ Spannungsverhältnissen und dem Exkavationsvorgang. Stoffliche bzw. mechanische Heterogenitäten beeinflussen dabei die Spannungsverteilung im Gestein und können als Stresskonzentratoren für die Nukleation und Propagation neuer Klüfte wirken. Das Experiment sieht deshalb in einem ersten Arbeitsschritt vor, mittels Bohrungen eine detaillierte geologische und strukturelle Analyse an ungestörtem Opalinuston vorzunehmen und sich ein Bild über die stoffliche Heterogenität und Anisotropie des Gesteins zu verschaffen. Daneben werden mittels geophysikalischer Messungen und Laboruntersuchungen die für die Modellierung erforderlichen petrophysikalischen und felsmechanischen Kennwerte ermittelt. In einem zweiten Schritt wird Anfangs 2005 eine Testnische ausgebrochen und die infolge der Spannungsumlagerungen gebildeten Klüfte der Auflockerungszone beschrieben. Mittels Rechensimulationen soll das

Trennflächensystem der EDZ nachgebildet und die Ergebnisse mit den Befunden des Experimentes verglichen werden. Die Ingenieurgruppe der ETH Zürich hat sich in der Berichtsperiode intensiv mit der Anwendbarkeit und der Entwicklung eines entsprechenden Rechencodes beschäftigt und verschiedene Testrechnungen durchgeführt.

THEMENBEREICH MENSCH, ORGANISATION UND SICHERHEITSKULTUR

Das **OECD Halden Reactor Project – Man Machine Systems Research** [4] untersucht die Leistungsfähigkeit und Grenzen von Menschen bei der Überwachung und Steuerung komplexer Systeme. Dabei werden als wichtigste Einrichtungen der Halden-Reaktor, das Halden Man-Machine-Laboratory (HAMMLAB) und das Virtual Reality Studio eingesetzt. Es wird untersucht, wie sich Operateure in verschiedenen Situationen, z.B. bei einem Ausfall automatischer Systeme verhalten. Die Forschung im Bereich der Mensch-Technik Organisation beinhaltet empirische Studien zur Wechselwirkung zwischen Reaktoroperatoren und Kontrollsystemen, um herauszufinden, wie neue Technologien im Kontrollraum die Operateurleistung in kritischen Situationen beeinflussen. Die Experimente liefern Daten über menschliche Zuverlässigkeit und Fehler, welche ihrerseits in Rechnungen zur probabilistischen Sicherheit von Kernanlagen eingehen und technische Grundlage für Richtlinien und Normen bilden. Weiter dienen die Forschungsprogramme der Entwicklung besserer Methoden und Techniken für das Zustandsmonitoring und die Leistungsoptimierung.

Im Berichtsjahr wurde bei der **HRA – Human Reliability Analysis** [21] zum einen die vorgeschlagene Methode zur Quantifizierung auf der

Grundlage von Referenzfällen weiter ausgearbeitet, und zum anderen die dynamische Ereignisbaummethodik in einer Fallstudie angewendet.

Das erste Gebiet betrifft den Vergleich von Referenzfällen mit einer interessierenden Handlung (und deren Szenariokontext) sowie die Quantifizierung von Referenzfällen aus der Betriebserfahrung mit Fehlern durch Ausführung. Die Auswertung entsprechender Ereignisse führte zu einem Ansatz für die vergleichende Analyse, mit der sich ein Ereignis auf der Grundlage von Referenzfällen einordnen lässt. Zur Beurteilung der Ähnlichkeit werden strukturierte Handlungseigenschaften in Kombination mit situativen Aspekten betrachtet. Auf der Grundlage dieser Betrachtungen erfolgten erste Abschätzungen der Fehlerwahrscheinlichkeiten für die Referenzfälle. Werte, die in der HRA-Methode *THERP* empfohlen werden, erwiesen sich dabei als nützliche Orientierung für die Durchführung erster Abschätzungen.

Die Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der dynamischen Risikobewertung beschäftigten sich mit der Entwicklung von Modellen und Methoden zur Nutzung der dynamischen Ereignisbaummethodik und konzentrierten sich auf eine Studie zur Anwendung auf ein Szenario mit Frischdampfleitungsbruch. Im Anschluss an die Aufgabenanalyse, welche die auf das Szenario anwendbaren Verhaltensstrategien und Operateurhandlungen zu deren Implementierung identifiziert, wurden die Durchführungszeiten der Aufgaben abgeschätzt. Die daran anschliessende Arbeit beinhaltet die Validierung der sich daraus ergebenden Vorhersagen der gesamten Durchführungszeit sowie die Fertigstellung der Studie im Hinblick auf die Identifizierung bedeutsamer Sequenzen und Gelegenheiten für Operateurfehler.

Nationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit mit den Forschungsinstitutionen innerhalb der Schweiz war effizient und fruchtbar. Im Rahmen der laufenden Projekte fanden regelmässig Gespräche mit der HSK statt, insbesondere auch zu geplanten Nachfolgeprojekten sowie zur Umsetzung der Resultate in die schweizerische Sicherheits- und Aufsichtspraxis. Neben dem *Paul Scherrer Institut* findet im Rahmen der regulatorischen Sicherheitsforschung

die Zusammenarbeit mit folgenden Institutionen statt: Nationale Alarmzentrale, Sektion für die Überwachung der Radioaktivität (SUER) in Fribourg, Institut de Radiophysique Appliquée (IRA), 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 **5. und 6. EU-Rahmenprogramms** eingebunden:

- RIKORR [1]: EURATOM, Nr. FIKS-2000-00048, CASTOC – Crack growth of low alloy steel for pressure boundary components under transient light water reactor operating conditions
- STARS [3]: EURATOM, Nr. FIKS-2000-00041, NACUSP – Natural circulation and stability performance of BWRs
- OECD Halden Reactor Project [5]
- PHEBUS FP Programme [11]: EURATOM, Nr. FIKS-1999-00008, ICHEMM – Iodine chemistry and mitigation methods
- Aeroradiometrie 2 [15]: 5. EURATOM, Nr. FIKR-2000-20098, ECCOMAGS – European calibration and coordination of mobile and airborne gamma spectrometry
- Zusammenarbeit in der Dosimetrie [16]: EURATOM, Nr. FIKR-2001-00175, EVIDOS – Evaluation

tion of individual dosimetry in mixed neutron and photon radiation fields

Bei den folgenden Projekten handelt es sich um **internationale Kooperationsprogramme**:

- MSWI Project During Postulated Severe Accidents in LWRs [6]
- OECD-MCCI [7]
- OECD CABRI Water Loop Project [8], [9], [10]
- PHEBUS FP [11]
- OECD-FIRE [13]
- US-NRC & HSK Co-Operative Research Activities [14]
- OECD Halden Reactor Project [5]
- Felslabor Mont Terri [20]

Weitere internationale Kooperationen im Rahmen von Forschungsprojekten, internationalen Organisationen und Standardisierungsaktivitäten können den einzelnen Projektberichten entnommen werden.

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

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 spannenden Forschungsthemen für die Wissenschaftler sind somit gewährleistet. Der Trend zu internationalen Forschungskooperationen setzte sich auch in diesem Jahr fort.

Die Forschungsprojekte, welche im Jahr 2005 gestartet werden, orientieren sich inhaltlich ebenfalls an den einleitend beschriebenen Schwerpunkten. Grösstenteils handelt es sich dabei um Nachfolgeprojekte der im Berichtsjahr abgeschlossenen Aktivitäten. Eine gemeinsame Arbeitsgruppe der HSK und der Eidgenössischen Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA) hat ein Strategiepapier zum Thema *Strategie Regulatorische Sicherheitsforschung* erstellt, in dem die verschiedenen Themenbereiche nach ihrer Bedeutung für die Sicherheit, für den Kompetenzerhalt und für die Öffentlichkeit, sowie nach ihrer Dringlichkeit gewichtet sind. Es bildet die Grundlage für die künftige Ausrichtung der regulatorischen Sicherheitsforschung.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

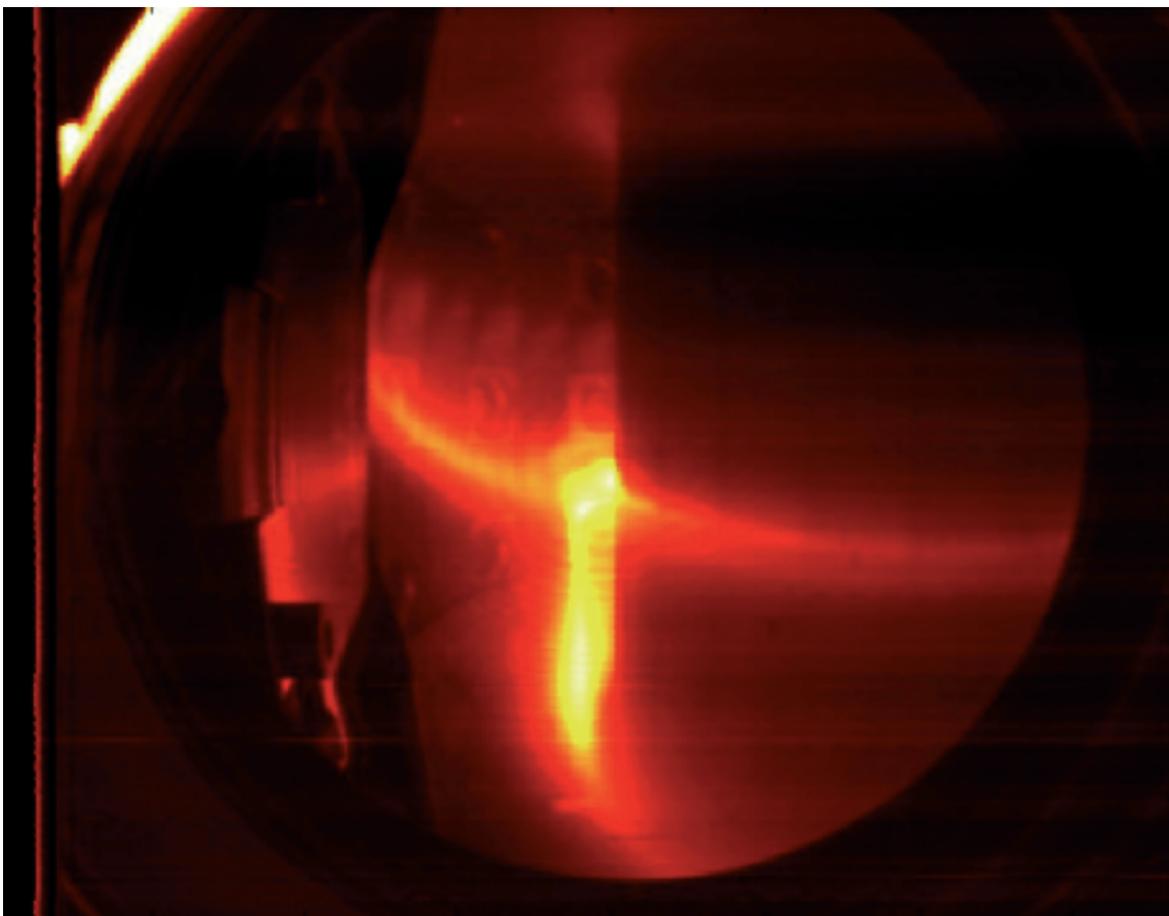
- [1] H.P. Seifert, S. Ritter, U. Ineichen, B. Gerodetti (hans-peter.seifert@psi.ch), PSI, Villigen, **Risskorrosion in druckführenden Komponenten des Primärkreislaufs von SWR, RIKORR II**(JB)
- [2] D. Kalkhof, H. Leber, M. Niffenegger, B. Tirbonod (dietmar.kalkhof@psi.ch), PSI, Labor für Werkstoffverhalten, Villigen, **Diagnostik für Werkstoffschädigung durch Ermüdung** (JB)
- [3] M. A. Zimmermann (martin.zimmermann@psi.ch), PSI, Villigen, **Safety Research in relation to Transient Analysis for the Reactors in Switzerland (STARS)** (JB)
- [4] N. Taylor (JRC-IE), D. Katsareas, EDF-SEPTEN, Lyon, France, **6th Project Meeting Network For Evaluating Structural Components from 18-19th March 2004 (NESC-III)** (JB)
- [5] W. Wiesenack, F. Øwre (wolfgang.wiesenack@hrp.no), Halden Reactor Project, N-1750 Halden, Norway, **OECD Halden Reactor Project: Nuclear Safety and Reliability, Fuels and Safety-Man-Machine-Systems Research** (JB)
- [6] B.R. Sehgal, H.S. Park, A.K. Nayak, R.C. Hansson, D. Shiferaw, A. Stepanyan, R.S. Rao, and A. Karbojian, (sun@energy.kth.se), Division of Nuclear Power Safety - Royal Institute of Technology, Sweden, **MSWI Project during Postulated Severe Accidents in LWRs** (JB)
- [7] A. Hügli (andre.huegli@hsk.ch), HSK, Villigen, **Begutachtung 2004 für das Projekt OECD-MCCI** according to the reports from Sudhamay Basu (sxb2@nrc.gov), U.S. Nuclear Regulatory Commission, **OECD MCCI** (JB)
- [8] C. Mäder (claudio.maeder@hsk.ch), HSK, Villigen, **Projektbegleiterbericht zum OECD/NEA CABRI Water Loop Project** (JB)
- [9] Summary Record of the 11th Meeting of the Technical Advisory Group of the OECD/NEA - IRSN **CABRI WL Project**, Garching, Germany, 17 – 18 November 2004
- [10] Status Report Nr. 7 IRSN-Report 2004/68: **CABRI Waterloop** Programme: Status Report Nr. 9, 17.11.2004
- [11] S. Güntay, J. Birchley, H. Bruchertseifer, R. Cripps, T. Haste, D. Gavillet, B. Jäckel, Z. Kopajtic (jonathan.birchley@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Villigen, **A synthesis of PHEBUS- FP Achievements and PSI In-kind Contributions**, Nov. 2004 (SB)
- [12] S. Güntay, D. Suckow, A. Dehbi, R. Kapulla (salih.guentay@psi.ch); **ARTIST: Introduction and first results**, Nuclear Engineering and Design, 231(2004) 109-120
- [13] S. Brosi (stefan.brosi@hsk.ch), HSK, Villigen, **OECD FIRE** (JB)
- [14] H. Speidel, P.Meyer, Reisebericht zur Nuclear Safety Research Conference 2004, Oct. 25-27, Washington DC Zusammenfassung der Vorträge im Rahmen der **Zusammenarbeit zwischen der US-NRC und der HSK**
- [15] B. Bucher, (benno.bucher@hsk.ch), PSI, Villigen, **Aeroradiometrie 3** (JB)
- [16] Ch. Schuler, M. Boschung, G. Butterweck, T. Schange, C. Wernli (christoph.schuler@psi.ch), PSI, Villigen, **Zusammenarbeit in der Dosimetrie** (JB)
- [17] J. Eikenberg, I. Mailand (jost.eikenberg@psi.ch), PSI, Villigen, **Zusammenarbeit in der Radioanalytik** (JB)
- [18] K. Ballmer-Hofer, C. Marty (kurt.ballmer@psi.ch), PSI, Villigen, **Evaluation einer kombinierten Therapie mit tumorvasculaturspezifischen Reagentien und ionisierender Strahlung** (JB)
- [19] A. Anstett, J. Jiricny, (jiricny@imr.unizh.ch), Institute for Molecular Cancer Research –University of Zürich, **Molecular Investigations of Cellular Radiosensitivity** (JB)
- [20] E. Frank (erik.frank@hsk.ch), HSK, Villigen, **Felslabor Mont Terri** (JB)
- [21] V. N. Dang (vinh.dang@psi.ch), PSI, Villigen, **Human Reliability Analysis (HRA) Applications and Methods Development** (JB)

FUSION THERMONUCLÉAIRE CONTRÔLÉE

Rapport de synthèse pour le programme de recherche 2004

Jean-François Conscience

jean-francois.conscience@sbf.admin.ch



Plasma dans le Tokamak à configuration variable (TCV) de l'EPF de Lausanne :

Ceci est une image vidéo en lumière visible (prise par une caméra CCD). La couleur rouge est artificielle, elle donne l'impression approximative de comment le plasma apparaîtrait à l'œil humain. Le courant du plasma est d'environ 280 kA. Une décharge analogue est réalisée comme *tir standard* du TCV et est effectuée chaque matin en vue de vérifier les conditions des parois de la machine.

Centres de gravité du programme

L'ampleur et les coûts de ce domaine très particulier de la recherche énergétique rendent une étroite coopération internationale indispensable. Aussi, en Suisse, les activités de recherche en fusion thermonucléaire sont-elles entièrement intégrées au programme *Fusion* de la Communauté européenne de l'énergie atomique (Euratom), auquel notre Pays est associé depuis 1978. Financées par le Domaine des Écoles polytechniques fédérales, par le Fonds national de la recherche scientifique et par la Commission de l'Union Européenne, elles sont effectuées, pour l'essentiel, au Centre de recherche en physique des plasmas (CRPP) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne

(EPFL), qui dispose d'installations à Lausanne et à l'Institut Paul Scherrer (PSI) de Villigen. En outre, avec un soutien financier de l'OFEN, des recherches, portant sur le comportement physico-chimique des parois des réacteurs de fusion après interactions avec le plasma, sont conduites par le groupe du professeur Oelhafen, à l'Institut de physique de l'Université de Bâle. Sur le plan administratif, la recherche en matière de fusion thermonucléaire a été contrôlée jusqu'à fin 2004 par l'Office fédéral de l'éducation et de la science (OFES), une responsabilité reprise le 1^{er} janvier 2005 par le Secrétariat d'État à l'éducation et à la recherche (SER).

Travaux effectués et résultats acquis en 2004

L'ESSENTIEL EN BREF...

- Les discussions sur la construction d'*ITER* sont restées bloquées en 2004, les six partenaires internationaux (Union Européenne, Chine, États-Unis, Japon, Corée du Sud et Fédération de Russie) n'ayant pu se mettre d'accord sur le choix du site.
- L'Union Européenne a toutefois annoncé sa détermination à aller de l'avant avec *ITER* en Europe en se passant, s'il le faut, des participations japonaises, américaines et coréennes.
- Le 23 juin 2004, le Conseil fédéral a prolongé pour une année trois accords de coopération avec le programme fusion d'EURATOM : l'*EFDA* (*European Fusion Development Agreement*), le *JIA* (*JET Implementing Agreement*) et l'Accord sur la mobilité.
- Au CRPP de 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 l'Institut Paul Scherrer, sur la supraconductibilité et les matériaux.
- Le groupe du professeur Oelhafen, à l'Université de Bâle, a collaboré avec les équipes des tokamaks *JET*, *TEXTOR* (Jülich), *Tore Supra* (Cadarache) et *TCV* (CRPP) pour caractériser les changements de surface que subissent des miroirs de tungstène et de molybdène après une exposition au plasma.

ITER (INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REACTOR)

Le monde de la fusion thermonucléaire contrôlée et ses observateurs ont retenu leur souffle en 2004 dans l'attente, malheureusement vaine, d'une décision sur le choix du site de construction d'*ITER*, le réacteur thermonucléaire expérimental destiné à démontrer la faisabilité technique et économique de l'exploitation de la fusion comme source d'énergie électrique. On se souviendra qu'à fin 2003 deux sites étaient en compétition, Rokkasho-mura, situé dans la partie nord de l'île principale du Japon et proposé par ce pays, et Cadarache, près d'Aix-en-Provence, proposé par l'Union Européenne. Ces deux propositions divisaient les six partenaires internationaux du projet, les États-Unis, le Japon et la Corée du Sud soutenant le site nippon, alors que l'Union Européenne, la Chine et la Russie se déclaraient en faveur du site français. Tout au long de 2004, d'intenses négociations bi- et multilatérales n'arrivèrent pas à débloquer la situation : ni le Japon, ni l'Union Européenne ne retirèrent leurs propositions et aucun des quatre autres partenaires ne put être amené à changer d'avis pour obtenir une majorité en faveur d'un des deux sites, et cela malgré des analyses détaillées qui mirent en évidence un léger avantage de Cadarache, notamment en ce qui concerne l'encadrement scientifique et technique (présence du Commissariat à l'énergie atomique français sur le site) et l'environnement général (écoles internationales, accès, risques de tremblement de terre, etc.). Conséquence de cette situation bloquée, les discussions portant sur les autres aspects du projet (structures légales

internationales de gestion du projet, mise sur pied du *Joint Undertaking* de l'Union Européenne destiné à gérer les contributions européennes au projet, etc.) sont restées au point mort et aucun progrès n'a été réalisé.

Un revirement s'est toutefois produit en cours d'année. Poussée par la France et après une analyse détaillée portant sur les aspects scientifiques, technologiques et financiers du problème, la Commission européenne a conclu qu'il était possible pour l'Europe de construire *ITER* à Cadarache en se passant des Japonais, des Américains et des Coréens. Forts d'une décision dans ce sens du Conseil des ministres *Compétitivité*, les négociateurs européens ont maintenant clairement fait état de cette détermination, mais, selon les termes du nouveau mandat qu'ils ont reçu, un dernier effort était encore tenté, en fin d'année, pour essayer de rallier *in extremis* les 6 partenaires autour du site provençal. En cas d'échec, *ITER* sera construit à Cadarache sous l'égide de la seule Union Européenne avec une contribution importante de la France et le soutien de la Fédération de Russie et de la Chine. D'autres pays (Inde, Brésil, etc.), qui ont déjà annoncé leur intérêt, seront invités à se joindre au projet avec des contributions inférieures à 10 % des coûts d'*ITER*. Finalement une invitation sera lancée aux pays associés au programme fusion d'EURATOM pour qu'ils versent une contribution additionnelle et volontaire. La Suisse a donné son appui à ce scénario et le Secrétaire d'État à l'éducation et à la recherche, Charles Kleiber, s'est déclaré prêt à envisager une contribution volontaire. Celle-ci serait versée en nature et profiterait donc directement à notre industrie ; en contrepartie, la Suisse demande à être impliquée plus activement et plus directement aux discussions et décisions sur *ITER*.

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'Union Européenne, dans le cadre du traité Euratom. Ce programme, rattaché aux Programmes-cadres de recherche et de développement technologiques (PCRDT) successifs, 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 au Royaume-Uni, de même que la participation européenne à *ITER*. En outre, il co-finance de nombreuses activités conduites dans des laboratoires nationaux qui

lui sont associés, comme, pour la Suisse, le CRPP de l'EPFL. Au titre du 6^e PCRDT (2002-2006) la recherche en fusion dispose ainsi de 750 millions d'Euros, dont 200 millions sont réservés pour la participation européenne à *ITER*. Un volet important de ce programme est l'*EFDA (European Fusion Development Agreement)* qui gère l'exploitation du *JET* et les travaux préparatoires d'*ITER* en Europe, de même que de nombreuses recherches en physique des plasmas et en technologie importantes pour la fusion. Depuis juin 2003, c'est le professeur Minh Quang Tran, directeur du CRPP, qui dirige ce programme avec le titre de *EFDA Leader*.

EURATOM ET LA SUISSE

L'Accord de coopération entre la Confédération suisse et Euratom, 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*, le *JIA (JET Implementing Agreement)*, qui règle l'utilisation de la grande installation européenne, l'*Accord sur la mobilité*, qui encourage les échanges de personnel, et le *Contrat d'association*, qui précisent les rapports scientifiques, techniques, administratifs et financiers du CRPP avec le programme *Fusion* européen. Les trois premiers accords arrivaient à échéance le 31 décembre 2004 et le Conseil fédéral a donné son accord, le 23 juin 2004, à leur prolongation jusqu'au 31 décembre 2005. Aux personnes qui s'étonneraient de ces renouvellements de courte durée, on répondra que l'Union Européenne elle-même ne pouvait pas s'engager au-delà de la fin du 6^e PCRDT en cours (2006), puisque le programme *Fusion* d'EURATOM pour le prochain 7^e PCRDT et son financement ne sont de loin pas encore approuvés ! En outre, le démarrage d'*ITER* entraînera un remaniement profond du programme européen et, en l'absence d'une décision qui tarde à venir, mais que l'on attendait pour 2004 (voir plus haut), la Commission européenne ne voulait pas figer le programme pour trop d'années. La contribution suisse au programme *Fusion* d'Euratom s'est élevée en 2004 à un peu plus de 8 millions de francs, auxquels s'ajoutent 600'000 francs en chiffres ronds versés au *JET Joint Fund* (une caisse commune pour l'exploitation du *JET* prévue aux termes du *JIA*). Ces contributions sont couvertes par les crédits ouverts pour financer la participation suisse à l'ensemble du 6^e PCRDT de l'Union Européenne et qui sont gérés par l'OFES (et depuis janvier 2005, par le SER).

LE CRPP : L'ASSOCIATION SUISSE/EURATOM

Les activités du programme *Fusion* européen sont très orientées vers *ITER*. À cet égard, le *JET* est devenu un véritable banc d'essai pour les technologies d'*ITER*, car le tokamak européen est fondé sur le même concept de confinement magnétique du plasma. En fait, l'année 2004 a été marquée par une interruption d'exploitation de plusieurs mois (de mars 2004 à février 2005) pour permettre l'installation de divers perfectionnements qui conduiront à une exploitation du *JET* dans des conditions encore plus proches de celles d'*ITER*. En mai 2004, en présence du Commissaire européen Philippe Busquin, *JET* a fêté le 25^e anniversaire de la pose de sa première pierre et le 20^e anniversaire de son inauguration. Le même mois, le Secrétaire d'État Charles Kleiber a visité *JET*.

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* (*International Fusion Materials Irradiation Facility*). En effet, la conviction est maintenant générale que cette dernière est aussi indispensable qu'*ITER* sur la voie de la domestication de la fusion, et un *Implementing Agreement* de l'Agence Internationale de l'Énergie (cf. *infra*) est en préparation pour coordonner les *EVEDA* (*Engineering Validation and Engineering Design Activities*) de cette future installation.

Comme par le passé, le CRPP a continué en 2004 d'être étroitement associé à toutes ces activités [2]. 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'EPF de Lausanne, et, d'autre part, sur la supraconductivité et les matériaux au PSI à Villigen. Dans le cadre des perfectionnements apportés au *JET* rappelés plus haut, le CRPP a développé un nouveau système d'antenne. 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*) est la grosse installation à disposition du CRPP à l'EPF de Lausanne. Elle 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 pour planifier la géométrie optimale du cœur des futures centrales thermonucléaires. C'est dans ce contexte que les recherches en physique des plasmas se sont poursuivies à l'EPF de Lausanne en 2004. Elles ont permis de caractériser plus avant les modalités du

chauffage par ondes cyclotron-électroniques, les effets de bords et de diverses perturbations sur le comportement du plasma et les exigences posées par le confinement magnétique. Des progrès ont notamment été réalisés quant à l'absorption efficace par le plasma de l'énergie apportée par la 3^e harmonique de l'onde cyclotron-électronique.

Le groupe de théorie du CRPP a continué en 2004 ses études sur les modèles gyro-cinétiques non linéaires des turbulences dans le plasma (voir figure). Ce projet prioritaire implique de nombreuses collaborations internationales et un exemple d'une telle simulation est donné dans la figure ci-contre. Les travaux ne se limitent pas aux tokamaks, mais envisagent aussi le comportement du plasma dans d'autres configurations comme, par exemple, les stellarators.

La nouvelle installation pour la physique des plasmas, *TORPEX* (pour *Toroïdal Plasma Experiment*), mise en service en 2003, est devenue complètement opérationnelle en 2004. Elle a confirmé qu'elle se prête bien à l'étude des phénomènes de turbulence et de transports anormaux dans les plasmas toroïdaux. C'est aussi un excellent instrument didactique pour la formation de physiciens spécialisés sur les plasmas.

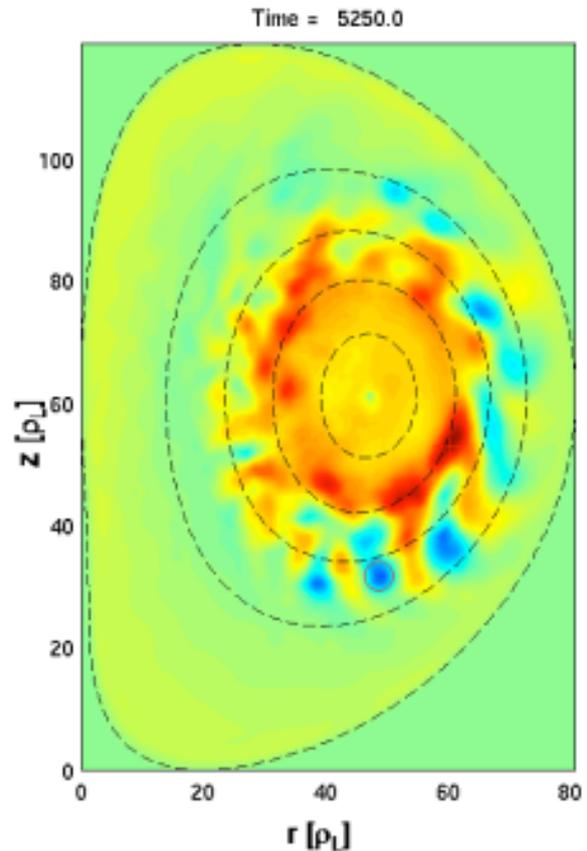


Figure: Exemple de simulation numérique de turbulences dans le plasma.

En supraconductivité, l'installation *SULTAN* du CRPP, également située au PSI, peut mettre à son actif une pleine année de tests pour des prototypes de câbles supraconducteurs destinés aux futurs aimants, avant tout d'*ITER*, mais aussi du *stellarator Wendelstein-7X* en construction à Greifswald (Land de Mecklembourg – Poméranie antérieure). Pour *ITER*, il s'agissait essentiellement d'échantillons fondés sur des alliages NbTi et Nb₃Sn.

L'attrait des futures centrales électriques basées sur la fusion thermonucléaire dépend beaucoup du développement de matériaux dits à *basse activation*, c'est-à-dire qui, soumis à un intense bombardement neutronique pendant des périodes prolongées, ne développent pas d'isotopes radioactifs à longue durée de vie, tout en conservant de bonnes propriétés mécaniques. C'est pourquoi, les recherches sur les matériaux sont un volet inséparable de la recherche en fusion, et de telles études ont été poursuivies tout au long de 2004 à l'antenne du CRPP située au PSI. Des études ont été effectuées sur les méthodes de déposition de film épais (plus de 100 µm) de tungstène sur des surfaces d'*EUROFER 97*, un acier spécial, pour les protéger de l'érosion à laquelle elles sont soumises dans les réacteurs

de fusion. De grand progrès ont également été faits en modélisation de défauts induits par irradiation neutronique dans les matériaux. De telles modélisations, combinées avec des analyses soigneusement choisies sur *SINQ*, permettent à cet important champ de recherche de progresser en attendant qu'*IFMIF* soit disponible pour soumettre des échantillons à des conditions d'irradiation comparables à celles qui règnent à l'intérieur d'un réacteur de fusion.

L'expertise mondialement reconnue du CRPP dans le développement de chauffage par ondes cyclotron-électroniques fait que cette institution s'est vu confier le rôle de laboratoire chef de file en Europe pour le développement du gyrotron destiné à *ITER* (170 GHz, 2 MW). L'installation à l'EPF de Lausanne, par le programme *Fusion* d'EURATOM, d'un banc d'essai pour cet instrument a débuté en 2004.

Toutes ces activités de recherches ont abouti en 2004 à plus de 70 articles scientifiques dans des revues spécialisées. Enfin, le CRPP a continué en 2004 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 avec l'Université de Bâle [1]

À l'Institut de physique de l'Université de Bâle, le groupe du professeur Oelhafen met 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. L'année 2004 a été placée sous le signe des miroirs. 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 bâlois est un auxiliaire précieux de ces études, et des collaborations se sont nouées, non seulement

avec le CRPP, partenaire traditionnel des Bâlois, mais aussi avec les équipes des tokamaks TEXTOR, à Jülich (Allemagne), Tore Supra, à Cadarache (France,) et, bien sûr, JET.

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 que, 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.

Autres collaborations et aspects internationaux

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)* conclus sein de l'AIE permettent de réaliser des activités de R&D en exploitant efficacement le savoir combiné d'experts et en évitant des duplications inutiles. Neuf IA sont actuellement en cours d'exécution et un nouveau (*EVEDA* d'*IFMIF*, cf. *supra*) est en

préparation. 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 concerne la recherche sur les matériaux (CRPP-PSI, cf. *supra*), et l'autre étudie les interactions plasma – paroi du réacteur (Université de Bâle, cf. *supra*)

Liste des projets de R+D

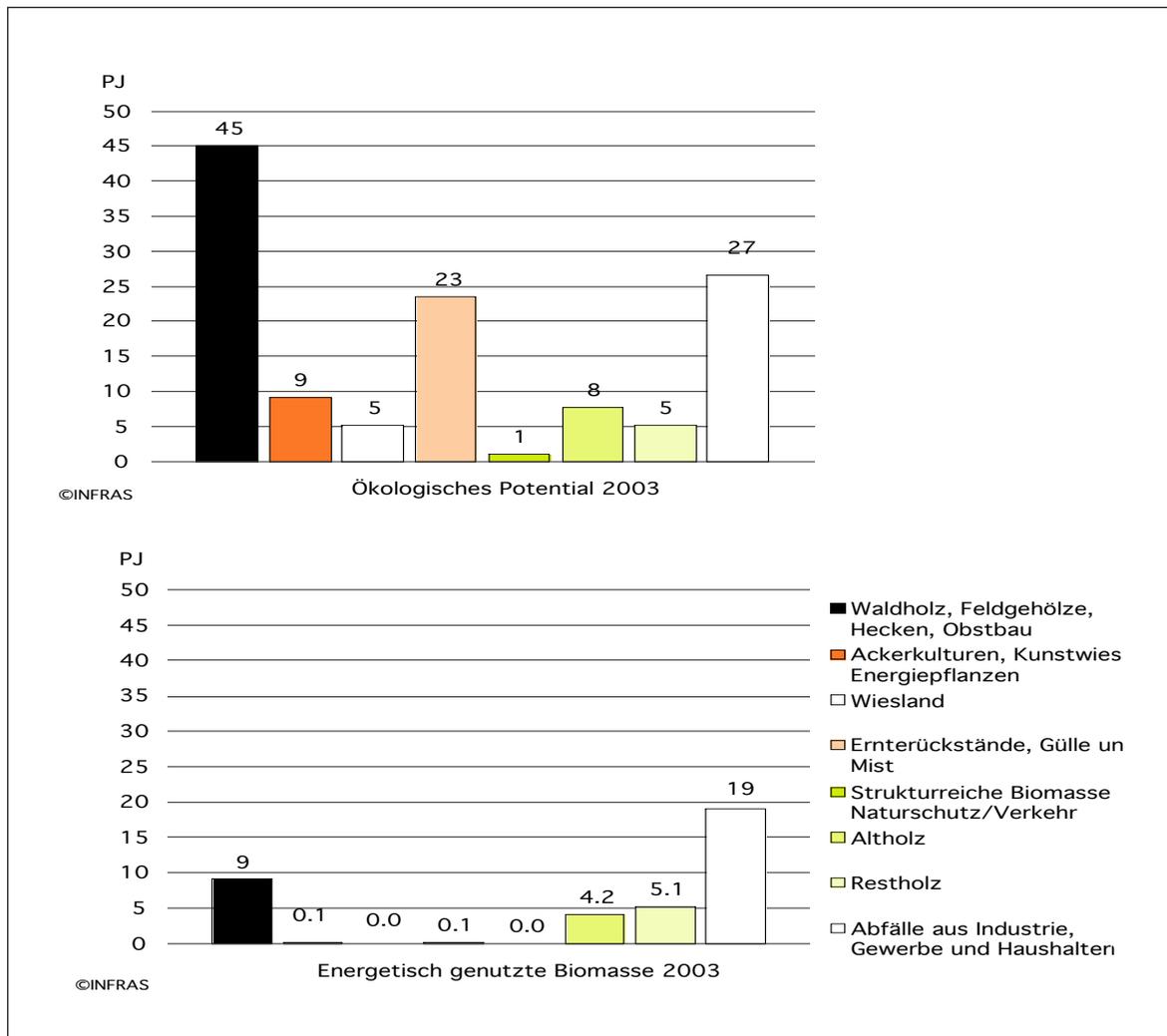
- [1] P. Oelhafen, (peter.oelhafen@unibas.ch ; <http://www.unibas.ch/phys-esca>), *Institut für Physik der Universität Basel* : **Plasma – wall interaction studies related to fusion reactor materials**. RA 2004.
- [2] CRPP, EPFL, Lausanne : **CRPP Annual Report 2004** ; <http://crppwww.epfl.ch/crppabout/ar/>

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN EWG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2004

Lukas Gutzwiller

lukas.gutzwiller@bfe.admin.ch



Ökologisches und heute genutztes Biomassepotential in der Schweiz

Das ökologisch sinnvoll nutzbare Potential beträgt 123 PJ und somit etwa ein Drittel des theoretisch nutzbaren Potentials. Heute werden erst 37 PJ des Biomassepotentials energetisch genutzt. Insbesondere aus land- und forstwirtschaftlicher Produktion gewonnene Biomasse könnte stärker für die Energieversorgung verwendet werden.

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.

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 Querschnittfunktion. Dazu kommen die beiden übergreifenden Themen der Energieperspektiven (www.energie-perspektiven.ch),

welche das strategische Ziel der Vision 2050 mit einschliesst, sowie der Technologietransfer. In den Energieperspektiven werden Energiepolitikinstrumente simuliert.

Daraus ergeben sich folgende sechs Bereiche (www.ewg-bfe.ch), welche auch dem vorliegenden Jahresbericht zugrunde gelegt wurden:

- Gebäude und Elektrogeräte
- Verkehr
- Wirtschaft
- Energiebereitstellung (Umwandlungssektor)
- Energieperspektiven – Vision 2050
- Technologietransfer

Neben den Arbeiten zu den **Energieperspektiven 2035/2050** stand der Abschluss der im Frühjahr 2003 ausgeschriebenen Projekte im Vordergrund. Zudem sollte das EWG **Schwerpunktprogramm** aufdatiert und mit dem Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007 harmonisiert werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2004

GEBÄUDE UND ELEKTROGERÄTE

Im Projekt ***Mobilisierung der Erneuerungspotentiale bei Wohnbauten*** [1] geht man davon aus, dass der energetische Zustand des Gebäudebestandes weit unter den heutigen wirtschaftlichen Möglichkeiten liegt. Bei Gebäudeerneuerungen wird zudem das energetische Effizienzpotenzial bei weitem nicht genutzt. Es werden das Erneuerungsverhalten im Bereich der Wohngebäude sowie die Rahmenbedingungen, die dieses Erneuerungsverhalten beeinflussen (wie Bau- und Planungsrecht, Mietrecht, Steuerrecht, Wohnungsnachfrage, Kreditvergabebedingungen, gesellschaftliche Werthaltungen und Zeitpräferenzen) erhoben. Aufgrund dieser Problemanalyse werden Strategien mit dazugehörigen Massnahmen und Instrumenten entwickelt, um den Rhythmus und die energetische Qualität der Erneuerungen im Hinblick auf einen nachhaltigen Gebäudebestand zu beeinflussen.

Die Empfehlungen der Untersuchung betreffen im Wesentlichen das Steuer- und Mietrecht. Die Wirksamkeit der *steuerlichen Abzüge* von Ener-

gieeffizienzmassnahmen bei Liegenschaften im Privatbesitz soll erhöht werden, indem die Einhaltung minimaler Standards zur Voraussetzung gemacht wird. Dazu kann auf Informationen zurückgegriffen werden, die im energetischen Vollzug benötigt werden: Vorschriften für Einzelbauteile, energetischer oder MINERGIE-Nachweis. Für die Geltendmachung von steuerlichen Abzügen bei Erneuerungen sollten mindestens die Einzelbauteilvorschriften für Neubauten erreicht werden bzw. der entsprechende Systemnachweis oder der MINERGIE-Sanierungsstandard. Andernfalls lassen sich die beträchtlichen Steuereinsparungen sachlich nicht begründen.

Bezüglich des Mietrechts wird aufgezeigt, dass die aktuellen Überwälzungsregeln von Investitionen (aufgeteilt nach Wert erhaltenden und Wert steigenden Investitionen) auf die Mieten in einem Umfeld mit geringer Inflation und meistens geringen Wertsteigerungen im Bereich nachhaltiger energetischer und ökologischer Investitionen sehr fragwürdig geworden sind. Es stimmt zwar, dass jede energetische Erneuerung einen Unterhalts-

anteil (Wert erhaltend) aufweist. Es ist jedoch aus der Sicht einer nachhaltigen Siedlungsentwicklung nicht erstrebenswert, dass dieser Unterhaltsanteil prozentual gleich bleibt, ob nun eine Erneuerung mit tiefem oder mit hohem energetischem Standard vorgenommen wird. Schon wegen der Möglichkeit die Energiekosten an die Mieter weitergeben, haben die Vermieter wenig Anreiz, zukunftsorientierte energetische Zielsetzungen anzuvizieren. Aus diesen Gründen sollte bei energetischen und allenfalls ökologischen Investitionen die volle Überwälzung mietrechtlich ermöglicht werden (allenfalls mit der Einschränkung, dass ein Projekt verhältnismässig ist, d.h. mit externen Kosten und mit den Zielsetzungen des Effizienzpfades gerechtfertigt werden kann und für denselben Zielbeitrag nicht viel kostengünstigere Varianten am Gebäude bestehen).

Das Ziel der Vorstudie **Monitoring / Gebäudeenergiepass** [2] beinhaltet die Aufarbeitung der Grundlagen zur Erfassung effektiver und vergleichbarer Energiekennzahlen. Durch dieses Monitoring sollen dank der erhöhten Markttransparenz die Energie als Entscheidungskriterium gefördert und damit Investitionen ausgelöst werden. Die Monitoring-Thematik ist in den EU-Ländern wenig ausgeprägt. An der Einführung von Gebäudeenergiepassen wird aber im Hinblick auf die Einführung der EU-Richtlinie *Energieeffizienz in Gebäuden* im Jahr 2006 gearbeitet. Relativ weit fortgeschritten sind diesbezüglich die Arbeiten in Dänemark.

Aufgrund der grossen Bedeutung des Energieverbrauchs in Wohngebäuden, der Entwicklung im europäischen Ausland und der fehlenden repräsentativen Datenbasis in der Schweiz empfehlen die Autoren, so rasch als möglich eine systematische Datenerfassung von Energie- und Gebäudekennzahlen im Wohnungsbausektor einzuführen. Diese Daten sind auch als Grundlage für die Erstellung von Energieprognosen und als Entscheidungsgrundlage für die Energiepolitik zwingend erforderlich.

Einem verwandten Thema widmet sich das Projekt **Internationaler Vergleich von Energiestandards** [3]. Die Energiestandards für Gebäude in der Schweiz wurden mit jenen Deutschlands, Österreichs, der Niederlande und Dänemarks verglichen. Analysiert wurde die Entstehungsgeschichte der Standards, deren heutige Ausgestaltung, die Schärfe der Standards sowie die Qualität des Vollzugs. Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Schweiz trotz schwieriger Ausgangslage eine gute Harmonisierung der Standards zwischen den Kantonen erreicht hat. Der Vollzug fällt im Vergleich zum Ausland nicht ab. Die Schärfe der Standards in der Schweiz ist unterschiedlich zu

beurteilen. Während elf Kantone mit ihren Standards im internationalen Vergleich gut mithalten können, sind die Standards der übrigen Kantone deutlich tiefer.

Im Anschluss an das erfolgreiche Projekt *Grenzkosten im Bereich Wohngebäude* wurden in einer zweiten Phase die **Grenzkosten bei forcierten Energieeffizienzmassnahmen und optimierter Gebäudetechnik bei Wirtschaftsbauten** [4] untersucht. Im Bereich der Wirtschaftsbauten bestehen ähnlich grosse und kostengünstige Energieeffizienzpotentiale wie bei den Wohngebäuden, aber aufgrund der komplexeren Gebäudehüllen und der vielfältigeren Nutzungsvielfalt auch Unterschiede. Das Projekt hat deshalb zum Ziel, die Grenz- und Durchschnittskosten für die Anwendung energieeffizienter Massnahmen (Wärmschutz sowie Heizungs- und Lüftungstechnik) für die wichtigsten Kategorien von Wirtschaftsbauten auf eine aktuelle empirische Basis zu stellen. Im Berichtsjahr 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.

Energieeffizienz-Investitionen können schnell unwirtschaftlich werden, wenn nur die energetischen Nutzen und die heutigen Energiepreise betrachtet werden. Dies führte zum Projekt **Direkte und indirekte Zusatznutzen von energieeffizientem Wohnbau** [5], in welchem die Zusatznutzen sowohl bei Neubauten als auch bei Sanierungen untersucht werden. Dazu gehören unter anderem die Reduktion der Aussenlärmimmissionen, bessere Raumluftqualität und höherer Wohnkomfort dank höherer Behaglichkeit (Innenraumtemperatur und -feuchtigkeit). Die Monetarisierung der Zusatznutzen wird durch die Zahlungsbereitschaft mit den beiden Methoden *Conjoint-Analyse* und *Hedonic Pricing* ermittelt. Die provisorischen Ergebnisse der *Conjoint-Analyse* lauten wie folgt:

- Beim *Neubau* ist es offenbar vor allem die Lufterneuerungsanlage, welche den BewohnerInnen einen grossen Nutzen stiftet. Entsprechend liegen die Werte für die Willingness-to-Pay (WTP) im Bereich von 5% bis 8%. Eine noch weiter gehende Wärmedämmung als es bei Neubauten ohnehin üblich ist bzw. dreifachverglaste Fenster beeinflussen das Wahlverhalten insbesondere bei den MFH noch positiv, aber die daraus abgeleitete Zahlungsbereitschaft ist mit 0% bis 3% deutlich geringer. Im *Neubau* besteht zwischen Ein- und Mehrfamilienhäu-

sern im Allgemeinen eine recht gute Übereinstimmung.

- Bei *Sanierungen* erzielen verbesserte Fenster die grösste Zahlungsbereitschaft (9% bis 13%). Verbesserungen im Fassadenbereich (3% bis 4%) sowie Lüfterneuerungsanlagen (5% bis 6%) führen ebenfalls zu Zahlungsbereitschaften, die signifikant von 0 verschieden sind. Es besteht wiederum eine gute Übereinstimmung zwischen EFH und MFH. In absoluten Werten befinden sich die Werte bei MFH in einem Bereich von 80 bis 160 CHF/Monat und bei den EFH zwischen 30'000 und 60'000 CHF/Monat, was v.a. bei den Fenstern tendenziell auf eine Überschätzung der Ergebnisse hindeutet.

In zwei weiteren Projekten wurde die Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz von Gebäudekomponenten untersucht. Im Projekt **Kosten und Nutzen der Solarenergie bei energieeffizienten Bauten** [6] sollen die Potenziale und Hemmnisse für die Nutzung der Solarenergie im Rahmen von energieeffizienten Neubauten und Sanierungen vertieft untersucht und Lösungen für die Stärkung der Solarenergie im Rahmen der energieeffizienten Bauweise entwickelt werden. Dazu wird die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Solarenergie unter Berücksichtigung von Zusatznutzen untersucht. Durch Hochrechnungen wird abgeschätzt, welche energetische Bedeutung die Solarenergie im Rahmen der energieeffizienten Bauweise erlangen kann, wenn von der Realisierung der wirtschaftlichen Potenziale in den verschiedenen Gebäudekategorien ausgegangen und die Entwicklung der konkurrierenden Energiesysteme (v.a. Wärmepumpen, Holz, Klein-Blockheizkraftwerke) berücksichtigt wird. Zudem werden anreizorientierte Massnahmen entwickelt, mit welchen die Ausschöpfung der wirtschaftlichen Potenziale gefördert werden kann. Die Autoren kommen zum Schluss, dass im Marktsegment der energieeffizienten Gebäude, insbesondere bei Neubauten und Sanierungen nach *MINERGIE*- und *MINERGIE-P*-Standard, die aktive Solarnutzung vorteilhaft zur Minimierung der Gesamtenergiekosten beitragen kann. Die Nutzung von Solarenergie für die Warmwasseraufbereitung und für die Vorwärmung als Heizungsunterstützung ist in diesem Marktsegment wirtschaftlicher als gebäudeseitige Effizienzmassnahmen. Im Gegensatz dazu sind bei konventionell ausgeführten Bauten, die den heute geltenden gesetzlichen Anforderungen entsprechen, gebäudeseitige Effizienzmassnahmen (z.B. Gebäudedämmung) wirtschaftlich konkurrenzfähiger als die aktive Solarnutzung. Die Resultate dieser Untersuchung fliessen in die laufenden Arbeiten des BFE zu den *Energieperspektiven 2035/2050* ein.

Im Projekt **Minergie-Module Solar/Holz und Wärmepumpen** [7] wurde die Machbarkeit eines Modulansatzes für die Wärmeerzeugung in Einfamilien- und in kleinen Mehrfamilienhäusern (4-6 Wohnungen) abgeklärt. Der Lösungsansatz besteht im Wesentlichen darin, auf vorhandene Zertifizierungen und Dimensionierungsvorschriften abzustellen und diese durch weiter gehende Anforderungen an das Gesamtsystem und bezüglich Einzelkomponenten zu ergänzen. Die Machbarkeit der Module wird ins Zentrum gerückt und ausdifferenziert (Potenzial bezüglich Gebäude, technische Machbarkeit, insbesondere Reduktion der Komplexität, Spannungsfeld Gesamtbeurteilung und Modulansatz, Voraussetzungen bezüglich Ausbildung, Kommunikation, Marketing und Akzeptanz). Das Projektteam kommt zum Schluss, dass die Definition von Modulen für die Wärmeerzeugung in kleinen Wohnbauten sinnvoll und machbar ist. Die Anforderungen an die Module sind auf drei Ebenen festzulegen, einer technischen, einer organisatorisch-administrativen und auf einer objektspezifischen Ebene. Letztere stellen sicher, dass die Anlagen in dafür geeigneten Bauten erstellt werden. Der grösste Teil der heute eingesetzten Systeme kommen für die Module grundsätzlich in Frage. In einigen Fällen ist die Kombination mit einer Solaranlage zwingend, damit die im Projekt vorgeschlagenen Kriterien erfüllt werden können.

Das Projekt **Best Practice – Marktordnung, Markttransparenz und Marktregelung** [8] beschäftigt sich mit der Durchsetzung energieeffizienter Lösungen im Bau-Markt. Die untersuchten Baumodule sind Wärmedämmung, Fenster, Lüftung und thermische Solaranlagen. Ausgangslage für dieses Projekt sind die teilweise erheblichen Preis- und Leistungsunterschiede a) zwischen Anbietern innerhalb der Schweiz sowie b) zwischen Schweizer Anbietern gegenüber dem Ausland (Grenzkosten). Das Projekt beschreibt die Marktsituation von *Best-Practice* Produkten, geht den Gründen von Preisunterschieden und Marktineffizienzen nach und untersucht, ob diese Marktineffizienzen ein Grund dafür sind, dass sich diese Produkte noch nicht im erwünschten Mass durchsetzen und analysiert aufbauend auf diesen Erkenntnissen, wie sich die Marktineffizienzen reduzieren lassen.

Die Autoren kommen zum Schluss, dass im Bausektor Informationsdefizite, *Prinzipal-Agent* Dilemmas sowie die allgemein schlechten Marktbedingungen für energieeffiziente Lösungen die schnellere Ausbreitung von *Best-Practice* Lösungen behindern. Verbesserte Information und Ausbildung könnten die Situation deutlich verbessern,

zumal dadurch auch die *Prinzipal-Agent* Problematik entschärft würde. Ein Bildungsfonds für das gesamte Baugewerbe sollte Anreize zur Weiterbildung erhöhen. Auch Labels für im Bereich Energieeffizienz gut ausgebildete Betriebe würden einen wichtigen Beitrag leisten. Schliesslich würden insgesamt bessere Rahmenbedingungen (wie eine CO₂-Abgabe) für energieeffiziente Massnahmen im Bausektor zu einem grösseren Markt für diese Produkte führen, wodurch Informationsdefizite schneller abgebaut und *Best-Practice* Lösungen sich schneller durchsetzen würden.

Das Projekt **Aus- und Weiterbildung an den Hochschulen im Bereich Bau/Energie** [9] hat zum Ziel, Wege aufzuzeigen, wie das Thema *Energie im Bau* noch besser in die Ausbildung an den Hochschulen integriert werden könnte; es wurden vorab folgende Fragen geklärt:

- *Ist Energie ein Thema an den Hochschulen?* Die Analysen der Studiengänge Architektur, Bauingenieurwesen, HLKS (Heizung, Lüftung, Klima, Sanitär) und Maschineningenieurwesen zeigen, dass die notwendigen Grundlagen und Strukturen zur Thematisierung von Energie im Gebäudebereich vorhanden sind. Das Thema Energie wird von den Hochschulen demnach als wichtig erachtet.
- *Welche Wissens-Lücken bestehen?* Konkrete Wissens-Lücken der Hochschulabgänger konnten bis anhin keine genannt werden.
- *Welche Anforderungen hat der Markt an die Studienabgänger?* Dazu wurden keine Studien oder Unterlagen gefunden.

Die Analysen zeigen, dass die Grundstudien den Hochschulabgängern genug Wissen vermitteln, um den heutigen Anforderungen im Markt zu genügen. Energie-Wissen gilt als Spezialfachwissen. Dieses eignen sich die Fachpersonen mit entsprechenden Weiterbildungen an. Befragungen zeigen, dass energetisch gute Lösungen dann entstehen, wenn sie von der Bauherrschaft gefordert werden, das Planungsteam über die Fähigkeit verfügt, interdisziplinär zusammenzuarbeiten und mit den Lösungen auch die anderen Eigenschaften des Gebäudes zu verbessern. In der Analyse werden verschiedene Erfolg versprechende Möglichkeiten aufgezeigt, wie das BFE das Thema *Energie im Gebäude* indirekt in die Aus- und Weiterbildung an den Hochschulen einbringen kann.

ENERGIEFORSCHUNG UND TECHNOLOGIE-TRANSFER

Im Rahmen des *Technologie-Monitoring I* wurde ein erster Schritt für ein umfassendes und syste-

matisches **Technologie-Monitoring** gemacht. Zur Beurteilung der technologischen Entwicklung in wirtschaftlicher Hinsicht wurde eine einheitliche Methodik erarbeitet, wobei für vier Technologiebereiche (motorische Wärmekraftkopplung, Brennstoffzellenheizgeräte; Luft-/Wasserwärmepumpen für Einfamilienhäuser und Hochleistungswärmedämmung) die technologisch-wirtschaftliche Entwicklung in den letzten 10 Jahren analysiert und eine Abschätzung der bis ca. 2010 zu erwartenden Entwicklung vorgenommen wurde.

Mit der Weiterführung im **Technologie-Monitoring II** [10] wird die Analyse der wirtschaftlichen Entwicklung auf weitere, für die Zukunft der Energieversorgung relevante Technologien ausgedehnt. Die entscheidenden Einflussfaktoren für die wirtschaftliche Entwicklung der Technologien werden nach Möglichkeit analysiert. Dies betrifft insbesondere marktspezifische Einflüsse wie Markt- bzw. Anbieterstruktur, Konkurrenzsituation unter den Anbietern, Markttransparenz, etc. Angesichts des erforderlichen Betrachtungshorizontes bei energiepolitischen und energie-wirtschaftlichen Entscheidungen wird der Zeithorizont der Technologieanalysen von 2010 auf 2020 bis 2030 ausgedehnt. Die Konsequenzen der Technologieentwicklung für die Energiepolitik werden eingehend untersucht. Die Auswahl der untersuchten Technologien bzw. Technologiefelder basiert auf den Kriterien: bisherige Entwicklung, Absatz- resp. Effizienzpotenzial und Handlungsspielraum für die Technologieförderung. Zusätzlich besteht die Vorgabe, nach Möglichkeit ein Technologiebeispiel aus dem Mobilitätsbereich und ein weiteres aus dem Bereich Industrie/Grossverbraucher zu bearbeiten. Untersucht werden: Drehzahlvariable elektrische Motoren, Lüftungssysteme für Niedrigenergie-Wohnbauten, Membrantechnologie und Kunststofftechnologie für den Fahrzeugleichtbau.

Drehzahlvariable Antriebe haben sich seit Anfang der 90er Jahre von einer innovativen Technologie, die aufgrund einiger Kinderkrankheiten noch wenig verbreitet war, zu einer etablierten, zuverlässigen Standardlösung entwickelt. Informationen über Vor- und Nachteile sind heute leicht zugänglich. Für die Planung und Beschaffung existieren EDV-Werkzeuge. Der Aufwand für Ausbildung und Instruktion hat sich wesentlich reduziert. Damit sind auch die Transaktionskosten für die Endabnehmer resp. die in ihrem Auftrag arbeitenden Planer deutlich gesunken.

Für den Markterfolg von **Lüftungssystemen in Niedrigenergie-Wohnbauten** wird auch auf längere Sicht der Zusatznutzen in Form der gesteig-

gerten Luftqualität, etc. entscheidend bleiben. Die aus dem rein energetischen Blickwinkel berechneten Energiegestehungskosten der eingesparten Wärme lassen sich durch technische Fortschritte nicht auf das Mass der vermiedenen Wärmebereitstellungskosten reduzieren – auch dann nicht, wenn die Energiekosten massiv steigen oder die externen Kosten mitberücksichtigt werden.

Die energetische Gesamtrelevanz der **Membrantechnik** wird bestimmt durch das spezifische Energiesparpotenzial der verschiedenen Anwendungen sowie die Einsatzmöglichkeiten in der Wirtschaft. Dieses Marktpotenzial wiederum ist abhängig von der technischen Weiterentwicklung der Verfahren und damit verbundenen neuen Anwendungsgebieten. Die unterschiedlichen Ausgangslagen der Einsatzgebiete, Referenzverfahren etc. verunmöglichen die Bestimmung eines allgemeingültigen Werts für das spezifische Energiesparpotenzial. Die im Bericht vorgestellten Beispiele zeigen jedoch auf, dass bedeutende spezifische Einsparungen möglich sind durch Ersatz thermischer Trennverfahren mit Membrantechnik.

Die Durchsetzung des **Kunststoffleichtbaus im Fahrzeugbereich** hängt neben technischen und wirtschaftlichen Faktoren auch von der Entwicklung der Marktstrukturen ab, die gekennzeichnet ist durch die Verlagerung der Produktion ganzer Bauteile und Module von den Autoproduzenten zu den Zulieferern. Der Fahrzeugmarkt ist hoch kompetitiv. Wenn sich die Autoproduzenten durch das Angebot von energieeffizienteren Fahrzeugen einen Marktvorteil erhoffen, werden sie diese Chance ergreifen. Für die Schweizer Zulieferindustrie besteht dabei die Herausforderung, dass sie ihre innovativen Technologien bei den Stammproduzenten gegen konkurrenzierende Lösungen erfolgreich einbringen können, was nur dann eine Chance hat, wenn auf der Ebene des Produktnutzens, d.h. neuer Möglichkeiten durch den Einsatz faserverstärkter Kunststoffe, gleichzeitig die Integration in die Serienfertigung gelöst oder möglichst noch verbessert wird.

Das Projekt **Cluster Energie** [11] wurde erfolgreich abgeschlossen. Die Cluster-Theorie hat sich in den vergangenen Jahren als wichtiger Ansatz für die Analyse von Innovationsprozessen zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen etabliert. Basierend auf diesem Ansatz wird hier untersucht, ob sich in der Schweiz aus den Aktivitäten von Energie2000 bzw. EnergieSchweiz in spezifisch unterstützten Bereichen des Energiesektors ein leistungsfähiger Cluster von Unternehmen und weiteren Akteuren herausgebildet hat. Zur Analyse der Leistungsfähigkeit

eines allfälligen Clusters ist bei 1'193 Unternehmen aus den vier Bereichen Holzenergie, Sonnenenergie, Wärmepumpen und *MINERGIE* das Innovationsverhalten erfragt worden. Die Ergebnisse der von der Konjunkturforschungsstelle der ETH periodisch durchgeführten *Innovationserhebung Schweiz* dienen dabei als Referenzgrössen. Die Umfrage ergibt zwar das Bild einer hohen Innovationsaktivität, gleichzeitig wird aber deutlich, dass es den Unternehmen aus den vier Bereichen noch ungenügend gelingt, die Innovationen auch in national und international erfolgreiche Produkte umzusetzen. Insgesamt kann aus den Analysen nicht der Schluss gezogen werden, dass sich in den genannten Bereichen funktionierende und leistungsfähige Cluster-Strukturen herausgebildet haben.

In einem zweiten Arbeitsschritt sind Kurzporträts von ausländischen Cluster-Initiativen (Länder: A, SF, S, NL, GB, D und E) in den relevanten Bereichen des Energiesektors erarbeitet worden. Die interessantesten Beispiele aus Österreich und Deutschland sind in Form von Fallstudien vertieft worden. Das Augenmerk liegt dabei auf einer Beschreibung der ergriffenen Cluster-orientierten Fördermassnahmen und einer Auswertung der Erkenntnisse für die Schweiz. Das Resultat zeigt, dass der Staat vor allem auf der Nachfrageseite mit energiepolitisch begründeten Lenkungsabgaben und Normen positiv zur Clusterbildung beitragen kann, dass aber bei angebotsseitigen Massnahmen im Energiebereich kein Handlungsbedarf besteht.

Das Projekt **Devising a rule for the efficient allocation of research funds by CORE** [12] wurde mit dem Ziel lanciert, durch Anwendung einer Portfolioanalyse effektive Energieforschungsprojekte für die Schweiz zu bestimmen. Konkret bedeutet dies, dass die Diversifikationsmöglichkeit eines Projektportfolios analysiert wird, um zukünftige Erzeugungskosten bei gegebenem Preisvolatilitätsrisiko zu minimieren, bzw. ein minimales Preisvolatilitätsrisiko bei gegebenen Erzeugungskosten zu erzielen.

Die Durchführung des Projekts ist in drei Stufen gegliedert. In der ersten Stufe wurden drei konventionelle Endenergieträger ab Klemme (Gas, Benzin und Nuklear) und ein erneuerbarer Endenergieträger (Wasserkraft) betrachtet. Abhängig von verschiedenen Restriktionsszenarien sind unter der Anwendung ökonomischer Datenauswertungsmethoden verschiedene effiziente Grenzen (im Sinne von optimalen Portfolioszusammensetzungen) bezüglich dieser Energieträger bestimmt worden. Ohne Restriktionen und unter der Berücksichtigung des gesamten schweizerischen Endenergieverbrauchs im Jahre

2002 zeichnet sich ein überraschendes Bild ab. Für eine minimale Zunahme der Erzeugungskosten bei gegebenem Risiko wäre die Nutzung von 100% Nuklear angezeigt, während ein minimales Risiko bei gegebener Zunahme der Erzeugungskosten durch 100% Wasserkraft erreichbar wäre. Die anderen beiden Endenergieträger kommen nur dann zum Zuge wenn ein Zwischenpunkt auf der effizienten Grenze bezüglich dieser Energieträger gewählt wird. Das Bild ändert sich, wenn die zulässigen Anteile der Energieträger bestimmten Restriktionen unterworfen werden. Unter der konservativen Annahme, dass das optimale Energieportfolio maximal aus 30% Nuklear (31% im Jahr 2002) und aus 50% nicht erneuerbaren Endenergieträgern (82% im Jahr 2002) bestehen darf, verlangt eine minimale Zunahme der Erzeugungskosten bei gegebenem Risiko: 50% Wasserkraft, 30% Nuklear, 19.8% Benzin und 0.2% Gas. Der Schweizer Endenergiemix im Jahr 2002 liegt nicht auf der effizienten Grenze. Es besteht somit Potential, zukünftige Risiken und Erzeugungskosten durch eine entsprechende Auswahl von Energieforschungsprojekten zu minimieren.

Um das Modell realistischer zu gestalten, werden in der Projektstufe 2, externe Kosten der bereits verwendeten Endenergieträger berücksichtigt sowie weitere alternative Energieträger ins Portfolio aufgenommen. Im dritten Schritt wird das Modell auf Energieforschungsprojekte übertragen, wobei zusätzliche Informationen durch Befragung von BFE-Programtleitern ermittelt werden.

VERKEHR

Das Projekt **Massnahmen zur Absenkung des Flottenverbrauchs: Analyse der energetischen Wirkungen** [13] verfolgt zwei Ziele. Einerseits soll die relative Bedeutung verschiedener Einflussfaktoren auf den individuellen Kaufentscheid eines neuen Personenwagens empirisch erfasst, andererseits die Wirkungen der energieEtikette und eines Bonus-Malus-Systems auf den Flottenverbrauch von neuen Personenwagen abgeschätzt werden. Methodisch stützt sich das Projekt auf die *Contingent Valuation* (Erhebung der Zahlungsbereitschaft für Qualitätsmerkmale), die auf einer standardisierten Befragung von Neuwagenkäufern (159 Kleinwagen- und 157 Mittelklassewagenkäufer) basiert. Aufbauend auf den Resultaten der *Discrete-Choice* Analyse wird dann die energetische Wirkung quantifiziert. Die standardisierte Befragung der Neuwagenkäufer fand im Sommer 2004 statt. Erste Ergebnisse der *Discrete-Choice* Analyse liegen nun vor, so dass die Analyse der Wirkung bis im Frühjahr 2005 abgeschlossen werden kann.

UMWANDLUNGSSEKTOR (ERNEUERBARE ENERGIEN UND MARKTORDNUNG)

Im Projekt **Versorgung mit fossilen Treib- und Brennstoffen** [14] wird eine objektive Darstellung der Verfügbarkeit von Erdöl- und Erdgasressourcen angestrebt. Obwohl die Meinungen von pessimistischen und optimistischen Experten teilweise beachtlich abweichen, kann man davon ausgehen, dass das Ende des Erdölzeitalters noch lange nicht bevorsteht. Je nach Denkschule wird der Höhepunkt der weltweiten Förderung konventionellen Erdöls ab 2010 oder nach 2020 vorausgesagt. Doch werden verbesserte Technologien (insbesondere bei der Förderung nicht-konventionellen Erdöls), verstärkte Substituierung durch Erdgas, Biotreibstoffe und umweltfreundlicherer Kohle, sowie höhere Energieeffizienz die Verknappung konventionellen Erdöls abfedern. Der Übergang ins *post-fossile* Zeitalter könnte sich somit über Jahrzehnte hinausziehen und sich je nach Anwendungsbereich und geographischer Lage sehr vielfältig gestalten. Die Energiepreise werden laut den meisten Prognosen nur moderat ansteigen, obwohl infolge der wachsenden Abhängigkeit von wenigen Erdöllieferländern die Preisvolatilität zunehmen wird.

Im Projekt **Windenergie und Schweizerischer Wasserkraftpark** [15] wurden die möglichen Synergien zwischen diesen beiden erneuerbaren Energiequellen analysiert. Weil Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke sehr schnell ihre Produktion anpassen können, eignen sie sich hervorragend zum Ausgleichen/Ausregeln von unvorhergesehenen Konsumschwankungen bzw. Produktionsschwankungen, wie sie insbesondere bei Windenergieanlagen auftreten. Als eines der Hauptresultate der vorliegenden Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die Betreiber von Speicher- und Pumpspeichieranlagen ihre Regenergie kostendeckend günstiger anbieten können als Produzenten mit anderen Technologien. Das bedeutet einerseits, dass die schweizerischen Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke Deckungsbeiträge erwirtschaften können, die es ihnen erlauben, ihre Substanz zu erhalten und unter Umständen auszubauen (insbesondere Ausbau von Turbinen- und Pumpleistung). Andererseits erhalten die Bezüger von (noch relativ teurer) Windenergie bei einer Teilnahme der schweizerischen Kraftwerke an den geplanten Regenergiemärkten die benötigte Ausgleichsenergie tendenziell günstiger.

In einem Projekt, das soeben erfolgreich abgeschlossen wurde, werden die **Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse** [16] untersucht. Ziel dieser Studie war, die Potenziale

zur nachhaltigen und wirtschaftlichen Nutzung von Biomasse für Energiegewinnungszwecke in der Schweiz abzuschätzen. Dabei ging es nicht nur darum, die für Teilbereiche früher erstellten, input-orientierten bisherigen Potenzialstudien zu ergänzen oder aufzudatieren, sondern vielmehr darum, die ganzen Nutzungsketten von der Ernte und Bereitstellung der verschiedenen Biomassearten über die verschiedenen Konversionstechnologien bis hin zur Nutzung der gewonnenen Energie in Form von Wärme, Strom oder Treibstoffen zu untersuchen und darzustellen. Die Abschätzung der energetischen Nutzungspotenziale erfolgte im Vergleich zu den bestehenden fossilen Alternativen anhand von klar definierten Referenzobjekten und Anlagentypen. Zentrale Elemente dieser Potenzialstudie sind die bekannten Technologien zur Erzeugung von Wärme und Strom, die neuen Technologien zur Herstellung von Bio-Treibstoffen, sowie der Einsatz von GIS zur Darstellung der kompletten Nutzungskette anhand von Fallbeispielen. Die Beurteilungsansätze für die optimale Nutzung der vorhandenen Biomassepotenziale sind als Basis für die Entwicklung von geeigneten Nutzungsstrategien gedacht.

Die Resultate zeigen, dass das ökologische Biomassepotenzial langfristig (2040) dem 2.5- bis 3-fachen der heutigen energetischen Nutzung entspricht. Einige der untersuchten Technologien sind schon bei den heutigen Ölpreisen wirtschaftlich konkurrenzfähig. Unter der Annahme, dass der Ölpreis im selben Zeitraum auf mindestens den doppelten Preis ansteigen wird, werden es bis spätestens 2020 auch die übrigen Technologien sein. Gemessen an den jeweiligen Endenergieverbräuchen (Wärme, Strom und Treibstoffe) werden die Beiträge der untersuchten Anlagentypen im Jahr 2040 im Bereich zwischen 2% (z.B. Strom aus Biogasanlagen) und 10% (z.B. Wärme aus Holzfeuerungen, Anteil Bioethanol am gesamten Treibstoffverbrauch) liegen.

Im Rahmen der Energieperspektiven wurde das Technologie Assessment **Erneuerbare Energie und neue Nuklearanlagen** [17] erstellt. Dabei werden technische Optionen für die zukünftige Stromproduktion in der Schweiz analysiert. In der Elektrizitätswirtschaft stehen gewichtige energiepolitische Entscheidungen an, welche sowohl die Versorgungssicherheit wie auch die Klimaproblematik betreffen. Die Studie bildet damit die Grundlage für die Erarbeitung energiepolitischer Optionen.

Neue erneuerbare Energieträger und die Kernenergie unterscheiden sich grundlegend hinsichtlich ihrer Charakteristika, dem Grad der Entwicklung und der Marktreife, wirtschaftlicher Wettbe-

werbsfähigkeit und öffentlicher Wahrnehmung. Es gibt jedoch zumindest ein gemeinsames Merkmal: beide Energieträger produzieren CO₂-freie Elektrizität. Die vorliegende Arbeit untersucht, wie gross das Potential und die Kostenentwicklung innerhalb der nächsten 30–40 Jahre sein könnten, welche Kosten bei den verschiedenen Varianten erwartet werden können und welche Hindernisse überwunden werden müssen, bevor das Mögliche auch realisiert werden kann. Folgende erneuerbare Energiesysteme werden behandelt: Kleinwasserkraft, Windenergie, Photovoltaik, solarthermische und solarchemische Stromerzeugung, Geothermie und Wellenkraft. Bei der Windenergie werden sowohl die einheimische Produktion, als auch der Import von Windstrom berücksichtigt; solarthermische und solarchemische Stromerzeugung sowie Wellenkraft beziehen sich ausschliesslich auf Potenziale für den Import. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt jedoch im Bereich der einheimischen Stromerzeugung. Grosses Augenmerk wurde auch auf die jeweiligen Technologien und die technologischen Fortschritte sowie die Kostendegressionen innerhalb des Untersuchungszeitraums gelegt.

Auch das Projekt **Ausbaupotential der Wasserkraft** [18] wurde im Rahmen der Energieperspektiven erstellt. Es trägt der Tatsache Rechnung, dass die Wasserkraft ein wichtiges Standbein der schweizerischen Elektrizitätsversorgung ist. Die letzte Schätzung über deren Ausbaupotential in der Schweiz liegt über zehn Jahre zurück, demzufolge sich eine Neubeurteilung der künftigen möglichen Erschliessung des Wasserkraftpotentials aufdrängte. Das Projekt analysiert neue Tendenzen im technologischen, wirtschaftlichen und ökologischen Umfeld für den hydraulischen Kraftwerkpark. Es wurden die 20 wichtigsten Einflussgrössen (Treiber) auf das Ausbaupotential identifiziert. Schliesslich wurde das Gesamtpotential als Summe des Ausbaupotentials und der Produktion des bestehenden Kraftwerkparks unter Berücksichtigung der Restwasserbestimmungen im Gewässerschutzgesetz ermittelt.

Bis 2050 wird bei normalen bis sehr guten Rahmenbedingungen und je nach Szenario ein möglicher Produktionszuwachs bei der Wasserkraft von 1'800 bis 5'800 GWh erwartet; im Fall von eher ungünstigen Rahmenbedingungen könnte bestenfalls eine Stabilisierung erwartet, schlimmstenfalls müsste ein Produktionsrückgang von 1'100 GWh in Kauf genommen werden. Besonderes Augenmerk gilt den strategischen Aussagen und Empfehlungen der Autoren zur weiteren Entwicklung der Wasserkraft. Methodisch lässt sich einwenden, der Bericht betone bei den Potential-

Überlegungen die Restwasserfrage mehr als andere Einflussfaktoren wie z.B. die Liberalisierung, die Entwicklung von Angebot und Nachfrage, die Baukosten oder die Elektrizitätspreise. Damit die Wasserkraft in einem künftigen liberalisierten Strommarkt im Vergleich zu anderen Strompro-

duktionsarten ihren hohen Stellenwert beibehalten kann, ist laut den Autoren eine Verbesserung der Rahmenbedingungen unerlässlich; zudem ist für die Wasserkraft ein gutes Image wichtig, das unter anderem durch die Sanierung der Gewässersituation (Restwasser) angestrebt werden kann.

Nationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des Forschungsprogramms *Energiewirtschaftliche Grundlagen* 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 im Gebäudebereich am Statusseminar an der ETHZ und am Perspektivenforum *Zukunft der Energienutzung und Energieeffizienz im Gebäudebereich* vorgestellt. Auch an der Tagung des Departements *Erfolgskontrolle* der kantonalen Energiefachstellen wurden mehrere EWG-Projekte vorgestellt.

Zudem fliessen die Resultate mehrerer Untersuchungen, die im letzten Halbjahr abgeschlossen worden sind, in die Arbeiten der **BFE-Energieperspektiven** ein. Folgende Projekte sind dabei speziell zu erwähnen: *Biomasse-Potential* [16], *Kosten-Nutzen von Solarenergie* [6], *Sanierungsverhalten bei bestehenden Bauten* [1], *Grenzkosten von Wirtschaftsbauten* [4] und das *Technologie-Monitoring II* [10].

Internationale Zusammenarbeit

In diversen Projekten sind internationale Hochschulinstitute oder Forschungsstellen direkt beauftragt oder im Rahmen von einzelnen Projekten wie beispielsweise **Intenationaler Vergleich von Energiestandards im Baubereich** einbezogen worden. Die Berücksichtigung der internationalen Forschungsliteratur und der rege Austausch an Fachkongressen, in Zeitschriften usw. stellt dabei eine Selbstverständlichkeit dar.

Auf europäischer Ebene ist innerhalb des sechsten Rahmenprogramms – wie für die technischen

Forschungsprogramme – das Schwerpunktthema *sustainable energy systems* wichtig. Dabei werden zwei Unterprogramme unterschieden: kurzfristige Energieforschung (DG-TREN) und längerfristige Energieforschung (DG-RTD). Für EWG ist vor allem das erste Unterprogramm wichtig. Je nach Bedarf werden Schweizer Beteiligte im Rahmen von klar umschriebenen Aufgaben finanziell unterstützt.

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Neben den Arbeiten zu den **Energieperspektiven 2035/2050** war das Jahr 2004 geprägt durch den Abschluss der im Frühjahr 2003 ausgeschriebenen Projekte. Zudem wurde das EWG **Schwerpunktprogramm** aufdatiert. Dieses orientiert sich am *Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007* und leitet die neuen Schwer-

punkte von den Zielen der sich in Arbeit befindenden Technologie-Roadmap ab. Das Ziel dieser Roadmap ist die Identifizierung von viel versprechenden Technologien zum Erreichen einer 2000-Watt-Gesellschaft. Im Jahr 2004 standen die Projekte im Gebäudebereich im Vordergrund. Dieser Bereich wird in Zukunft noch stärker mit den Kan-

tonen koordiniert. Insbesondere besteht die Absicht, zusammen mit einzelnen Energiefachstellen der Kantone stichprobenweise die Energiekennzahlen von bestehenden Bauten, wenn möglich vor und nach der energetischen Sanierung, zu erheben.

Auch das Jahr 2005 wird geprägt sein durch die Arbeiten zu den Energieperspektiven 2035/2050; der Beginn der Arbeiten zur **Vision 2050** ist für

die zweite Jahreshälfte geplant. Wegen den laufenden Arbeiten zu den Energieperspektiven konnte im letzten Jahr keine Ausschreibung von neuen Projekten durchgeführt werden. Basierend auf dem neuen Schwerpunktprogramm soll im Frühjahr 2005 eine **Ausschreibungsrunde** durchgeführt werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2004 vorhanden

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

Sämtliche Schlussberichte können auch unter www.ewg-bfe.ch heruntergeladen werden.

- [1] W. Ott (walter.ott@econcept.ch), econcept, M. Jakob, CEPE, Zürich: **Mobilisierung der Erneuerungspotentiale bei Wohnbauten** (JB).
- [2] A. Baumgartner (andreas.baumgartner@amstein-walthert.ch), R. Sigg, Intep, Zürich: **Monitoring/Gebäudeenergiepass** (SB).
- [3] S. Rieder (rieder@interface-politikstudien.ch), Zürich, und W. Eichhammer, Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe (D): **Internationaler Vergleich von Energiestandards** (SB).
- [4] 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** (JB).
- [5] W. Ott (walter.ott@econcept.ch), econcept, M. Jakob, CEPE, Zürich: **Direkte und indirekte Zusatznutzen von energieeffizientem Wohnbau** (JB).
- [6] R. Iten (rolf.iten@infras.ch), Infrac, Zürich, A. Haller (E. Schweizer Metallbau), L. Keller (Bureau d'Etudes Keller-Burnier): **Kosten und Nutzen der Solarenergie bei energieeffizienten Bauten** (SB).
- [7] J. Gallati (justus.gallati@secon.ch), M. Portmann, B. Zurfluh, Luzern: **Minergie-Module Solar/Holz und Wärmepumpen** (SB).
- [8] E. Staehlin (elke.staehlin@bss-basel.ch), W. Hässig (Basler&Hofmann), Basel und Zürich: **Best Practice – Marktordnung, Markttransparenz und Marktregelung im Baubereich** (SB).
- [9] T. Lang (thomas.lang@km-marketing.ch), und M. Kunz, ZHW, Winterthur: **Aus- und Weiterbildung an den Hochschulen im Bereich Bau/Energie** (SB).
- [10] H.P. Eicher & R. Rigassi (reto.rigassi@eicher-pauli.ch), Eicher+Pauli, Liestal; W. Ott, econcept, Zürich: **Technologie-Monitoring** (SB).
- [11] S. Suter & A. Müller (suter@ecoplan.ch), Ecoplan, Bern; F. Ohler & L. Jörg, Technopolis, Wien: **Cluster Energie** (SB).
- [12] P. Zweifel und B. Krey (pzweifel@soi.unizh.ch), Sozioökonomisches Institut der Uni Zürich: **Devising a rule for the efficient allocation of research funds by CORE** (JB).
- [13] R. Iten und S. Hammer (rolf.iten@infras.ch), Infrac, Zürich, R. Wüstenhagen und K. Sammer, IWÖ, HSG, St. Gallen: **Massnahmen zur Absenkung des Flottenverbrauchs: Analyse der energetischen Wirkungen** (JB).
- [14] W. Kägi, E. Staehelin-Witt, M. Schäfli & U. Eichenberger (wolfram.kaegi@bss-basel.ch), B.S.S., Basel: **Versorgung mit fossilen Treib- und Brennstoffen** (SB).
- [15] W. Ott (walter.ott@econcept.ch), econcept, Zürich: **Windenergie und Schweizerischer Wasserkraftpark** (SB).
- [16] B. Oettli (Bernhard.Oettli@infras.ch), Infrac, Zürich, J.-L. Hersener, U. Meier, K. Schleiss, E. Gnansounou: **Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse** (SB).
- [17] S. Hirschberg (Projektleitung) (stefan.hirschberg@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Villigen: **Erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen** (SB).
- [18] F. Laufer, S. Grötzinger, M. Peter, A. Schmutz (fred.laufer@ewe.ch), Electrowatt-Ekono, Zürich: **Ausbaupotential Wasserkraft** (SB).

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>
EAWAG/ IFAEPE	Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz / Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux, <i>Dübendorf</i>
EMPA/ LFEM	Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt / 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-PB	Laboratoire d'énergie solaire et de physique du 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
IQE	Institut für Quantenelektronik
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
EIVD	École d'Ingénieurs 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 und 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	Instituto Scienze della Terra
USI	Università della Svizzera italiana, <i>Lugano</i>
MecoP	Istituto di Microeconomia e economia Pubblica
	Universität <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>

INTERNATIONALE ORGANISATIONEN & PROGRAMME / ORGANISATIONS & PROGRAMMES INTERNATIONAUX

GROWTH	European Research on Advanced Materials (5 th European Framework Programme (FP))
CORE	Commission fédérale pour la recherche énergétique/Eidgenössische Energieforschungskommission
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	Is a pan-European network for market-oriented, industrial R&D : Bringing European Innovation to a World Market / Europäische Innovation für den Weltmarkt / Promouvoir l'innovation européenne sur le marché mondial
NEA / AEN	Nuclear Energy Agency
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 ¹⁾	Programmleiter / Chefs de programme	
			F + E / R + D	P + D
I. Rationelle Energienutzung / Utilisation rationnelle de l'énergie	Gebäude / Bâtiment	Andreas Eckmanns	Markus Zimmermann	
	Verkehr / Transports	Martin Pulfer	Martin Pulfer	
	Batterien, Supercaps / Batteries, supercaps			
	Elektrizitätsspeicherung & -transport / Stockage et transport de l'électricité	Felix Frey	Roland Brüniger	
	Elektrizitätsnutzung (Geräte) / Utilisation de l'électricité (appareils)			
	Wärme-Kraft-Kopplung (ohne Brennstoffzellen) / Couplage chaleur-force (sans les piles à combustible)	Fabrice Rognon	Thomas Kopp	Max Ehrbar
	Verbrennung / Combustion	Alphons Hintermann	Alphons Hintermann	
	Brennstoffzellen / Piles à combustible			
	Verfahrenstechnische Prozesse (VTP) / Technologie des procédés	Martin Stettler	Martin Stettler	
II. Erneuerbare Energien / Sources d'énergie renouvelables	Solarwärmespeicherung / Stockage de la chaleur solaire	Urs Wolfer	Jean-Christophe Hadorn	
	Solarwärme / Énergie solaire thermique		Jean-Christophe Hadorn	Urs Wolfer
	Photovoltaik / Photovoltaïque		Stefan Nowak	
	Solararchitektur / Architecture solaire	Andreas Eckmanns	Markus Zimmermann	
	Solarchemie inkl. Wasserstoff / Chimie solaire y compris l'hydrogène	Alphons Hintermann	Armin Reller	
	Umgebungswärme (Wärmepumpen) / Chaleur ambiante (pompes à chaleur)	Fabrice Rognon	Thomas Kopp	Max Ehrbar
	Biomasse (ohne Holz) / Biomasse (sans le bois)	Bruno Guggisberg	Bruno Guggisberg	
	Kleinwasserkraftwerke / Force hydraulique		Manuel Buser	
	Holz / Bois	Daniel Binggeli	Daniel Binggeli	
	Geothermie / Géothermie	Markus Geissmann	Harald L. Gorhan	
Windenergie / Énergie éolienne	Robert Horbaty			
III. Kernenergie / Énergie nucléaire	Kerntechnik und nukleare Sicherheit / Technique et sécurité nucléaire	Christophe de Reyff ²⁾	Konstantin Foskolos	—
	Regulatorische Sicherheitsforschung / Recherche réglementaire en sécurité nucléaire		Brigitte Faust	—
	Kernfusion / Fusion nucléaire		Andreas Werthmüller	—
IV. Energiewirtschaftliche Grundlagen / Fondements de l'économie énergétique	Energiepolitik / Politique énergétique	Lukas Gutzwiller	Lukas Gutzwiller	
	Ökonomie, Gesellschaft, Umwelt / Économie, société, environnement			
	Technologie-Transfer / Transferts technologiques	Andreas Gut, Christophe de Reyff, Gerhard Schriber		

¹⁾ Auch zuständig für den entsprechenden Marktsektor in EnergieSchweiz /
Aussi responsable du secteur de marché correspondant dans SuisseEnergie

²⁾ Das BFE ist hier lediglich Auskunftsstelle / L'OFEN a ici un rôle de répondant

ADRESSEN DER BFE-BEREICHSLEITER /

ADRESSE DES RESPONSABLES DE DOMAINES À L'OFEN

Daniel Binggeli, Tel. 031 322 68 23
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

Alphons Hintermann, Tel. 031 322 56 54
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

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

Robert Horbaty
 ENCO AG, Wattwerkstrasse 1, 4416 Bubendorf
 Tel. 061 965 99 00 – Fax : 061 965 99 01
 E-mail: robert.hotbaty@enco-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: manuel.buser@entec.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

Max Ehrbar
 Im Sixer 17a, 7320 Sargans
 tél. 081 723 36 35, Fax : 081
 E-mail: ehrbar.max@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.net@bluewin.ch

Brigitte Faust
 HSK, 5232 Villigen – HSK
 Tel. 056 310 39 16 – Fax : 056 310 39 95
 E-mail: brigitte.faust@hsk.ch

Armin Reller
 Universität Augsburg, Universitätsstr. 1,
 DE - 86159 Augsburg
 Tel. 0049 8215983000 – Fax : 0049 8215983002
 E-mail: reller@physik.uni-augsburg.de

Konstantin Foskolos
 PSI, 5232 Villigen – PSI
 Tel. 056 310 26 92 – Fax : 056 310 44 11
 E-mail: konstantin.foskolos@psi.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

Harald L. Gorhan
 Neudörfli 10, 5600 Lenzburg
 Tel. 062 891 83 68 – Fax : 062 891 83 68
 E-mail: harald.gorhan@bluewin.ch

Markus Zimmermann
 EMPA-ZEN, 8600 Dübendorf
 Tel. 01 823 41 78 – Fax : 01 823 40 09
 E-mail: mark.zimmermann@empa.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: jhadorn@baseconsultants.com