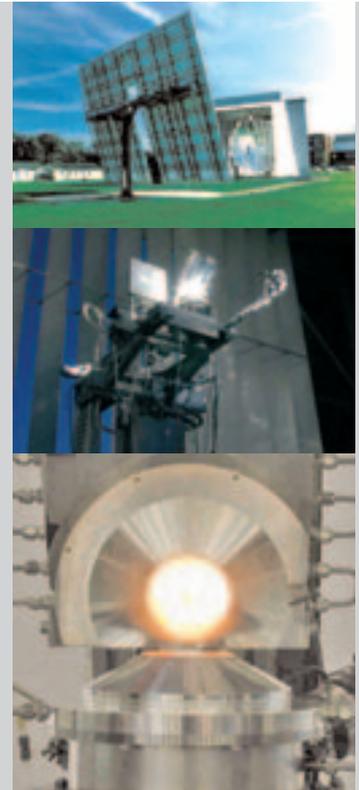
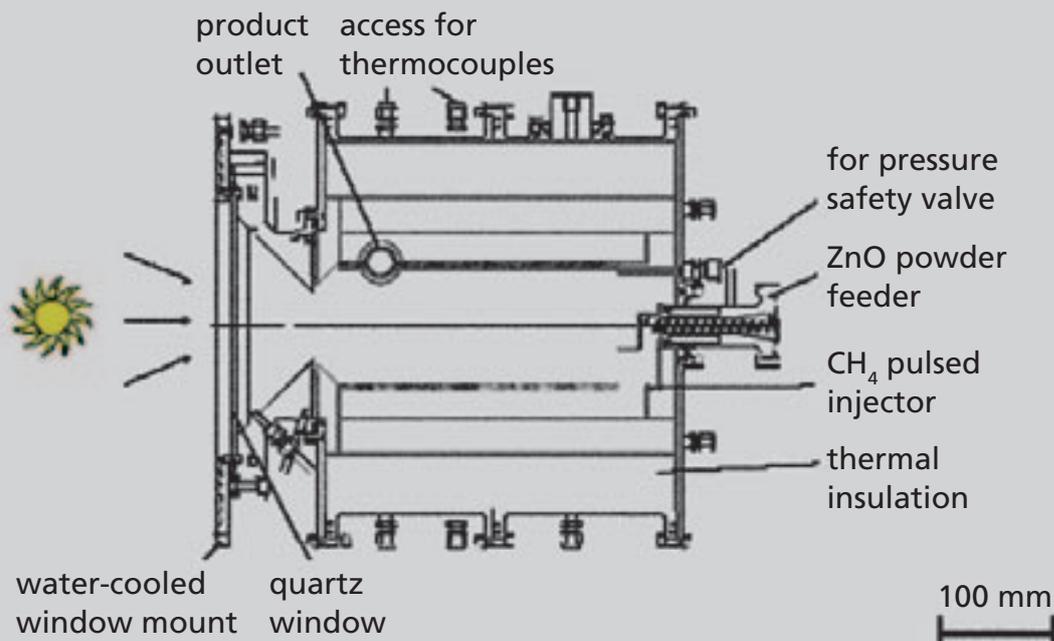


Energie-Forschung 2003 Recherche énergétique

Überblicksberichte der Programmleiter
Rapports de synthèse des chefs de programme



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

Andreas Gut, BFE, 3003 Bern
Tel. 031 3225324 Fax 031 3232500

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 3225666 fax 031 3232500

Bezugsort für Berichte:

Centre de distribution pour les rapports
ENET, Egnacherstrasse 69, 9320 Arbon
www.energieforschung.ch
Tel. 071 4400255 Fax 071 4400256

31.05.2004

Vorwort / Avant-propos		3
Fortschritte der Energieforschung 2003 / Survol de la recherche énergétique en 2003		4
Überblicksberichte der Programmleiter / Rapports de synthèse des chefs de programme		
RATIONELLE ENERGIE- NUTZUNG / UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE	Rationelle Energienutzung in Gebäuden	9
	Verkehr und Akkumulatoren	23
	Elektrizität	37
	Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte	51
	Feuerung und Verbrennung	65
	Brennstoffzellen	79
	Verfahrenstechnische Prozesse	91
ERNEUERBARE ENERGIEN / SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLES	Solaire actif: chaleur et stockage de chaleur	95
	Photovoltaik	113
	Solarchemie / Wasserstoff	131
	Biomasse	141
	Kleinwasserkraftwerke	153
	Geothermie	159
	Windenergienutzung	171
KERNENERGIE / ÉNERGIE NUCLÉAIRE	Nukleare Sicherheit und Entsorgung	183
	Regulatorische Sicherheitsforschung	195
	Fusion thermonucléaire contrôlée	205
ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN / FONDEMENTS DE L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE	Energiewirtschaftliche Grundlagen	211
Anhänge / Annexes		
Abkürzungen / Sigles		223
Energieforschungsorganisation (F+E & P+D) / Organisation de la recherche énergétique (R+D & P+D)		224
Wichtige Adressen / Adresses importantes		225

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 neue *Liste der Projekte 2002/2003 – Forschung, Entwicklung und Demonstration im Bereich der Energie in der Schweiz* wird im Herbst 2004 erscheinen. Sie gibt Auskunft über die Aufwendungen der mit öffentlichen Mitteln finanzierten Energieforschung sowie eine detaillierte Zusammenstellung der Geldflüsse. Die Zahlen für 2003 liegen noch nicht vor, sie dürften allerdings kaum wesentlich von denen der Vorjahre abweichen.

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

Um ein möglichst grosses Publikum zu erreichen, kann der vorliegende Bericht – zusammen mit weiteren Publikationen – auch auf der Internetseite des BFE (www.energie-schweiz.ch) unter der Rubrik *Forschung* eingesehen und heruntergeladen werden. In der Zeitschrift *ENET-News* wird zudem dreimal jährlich über aktuelle Projekte der Energieforschung berichtet. 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 bei ENET bezogen werden (www.energieforschung.ch). Das Reproduzieren von einzelnen Beiträgen ist – unter Angabe der Quelle – gestattet.

Mai 2004

BUNDESAMT FÜR ENERGIE

Titelbild: Solarofen und Reaktor für den Zinkoxid/ Zink-Kreislauf zur nachhaltigen Wasserstoffproduktion; s. auch Seite 134 (Quelle: PSI).

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 nouvelle *Liste des projets 2002/2003 – Recherche, développement et démonstration dans le domaine de l'énergie en Suisse* paraîtra en automne 2004. Elle inclut les moyens attribués par les pouvoirs publics à la recherche énergétique, et donne aussi une revue détaillée des montants provenant des diverses sources de financement. Les chiffres pour 2003 ne sont pas encore connus, mais ils ne devraient guère s'éloigner de ceux des années précédentes.

Le présent volume comprend les rapports de synthèse annuels des chefs de programme de l'OFEN. On y trouvera décrits les progrès accomplis dans les divers projets cofinancés par l'OFEN. Il y est également fait mention des travaux de RD&D réalisés avec d'autres moyens publics et/ou privés.

Ce document est conçu pour être consulté – tout comme d'autres publications – sur le site Internet de l'OFEN, (www.suisse-energie.ch) et est destiné à un large public. De plus, le périodique *ENET News* permet, trois fois par année, de suivre les progrès de certains projets. La plupart des rapports annuels (RA) des projets individuels cités dans les rapports de synthèse sont aussi téléchargeables, à partir des liens hypertextes des rapports de synthèse. Les rapports finals (RF) des projets sont à commander auprès d'ENET sur le site Internet : www.energieforschung.ch. La reproduction d'extraits du présent document est autorisée – à condition d'en indiquer la source.

Mai 2004

OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉNERGIE

Page de titre: Four solaire et réacteur pour le cycle oxyde de zinc / zinc en vue d'une production durable d'hydrogène; voir aussi p. 134 (source : PSI).

FORTSCHRITTE DER ENERGIEFORSCHUNG 2003

SURVOL DE LA RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE EN 2003

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

Im Rahmen der Energieforschungsprogramme des BFE wurden im Berichtsjahr rund 330 Forschungs- und Entwicklungsprojekte (F+E) und mehr als 200 Pilot- und Demonstrationsprojekte (P+D) unterstützt. Die dafür eingesetzten Mittel von 35 Mio. Franken (F+E: 23 Mio. Franken, P+D: 12 Mio. Franken) wurden dabei durch Beiträge der Forschungsstätten, anderer Förderungsorgane und der Privatwirtschaft vervielfacht. Das Zusammenspiel von Forschung und Entwicklung, Pilot- und Demonstrationsprojekten und Massnahmen zur Markteinführung im Rahmen von *EnergieSchweiz* bewährt sich weiterhin. Es hat auch im Jahr 2003 auf mehreren Gebieten zu erfreulichen Erfolgen geführt.

Die folgende Auswahl von Projekt-Beispielen illustriert die breite Forschungskompetenz in der Schweiz, das Engagement der Forscher und der Industrie bei der Suche nach innovativen Lösungen zur Verbesserung unserer Energieversorgung und auch deren Bereitschaft zur internationalen Zusammenarbeit. Es sei darauf hingewiesen, dass über die Energieforschung der öffentlichen Hand auch an vielen anderen Stellen berichtet wird. Erwähnenswert sind der Jahresbericht der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE, welcher die Arbeiten in einen weiteren Kontext stellt, die Zeitschrift ENET-News, die in regelmässigen Abständen über neue Forschungsergebnisse orientiert sowie die ausführlichen Übersichten der ETH-Lausanne, der ETH-Zürich, des PSI und der EMPA. Über die Umsetzungsarbeiten – inklusive die Tätigkeiten der Transferstelle ENET – gibt zudem der Jahresbericht von *EnergieSchweiz* Auskunft.

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG

Die Forschungsarbeiten zum rationellen Energieverbrauch in Gebäuden waren Wegbereiter für die Einführung von **Gebäudestandards** wie *Minergie* und *Passivhaus*. Als Beispiel für ein P+D-Projekt sei das Passiv-Acht-Familienhaus *Im Wechsel* in Stans erwähnt, welches als Vorreiter den Standard für den Primärenergieverbrauch von 120 kWh/(m² a) einhält.

Im vergangenen Jahr hat erstmals ein **Wasserstofffahrzeug** am *Shell Eco-Marathon* in Nogaro, Südfrankreich, teilgenommen: der **PAC-Car**, der von der ETH Zürich zusammen mit dem PSI und der Universität von Valenciennes entwickelt wurde. Der elektrische Antrieb bezieht den Strom von einer Brennstoffzelle. Das extrem leichte, einplätziges Fahrzeug kann 15 Gramm Wasserstoff in einem Metallhydridspeicher mitführen und damit 90 Kilometer zurücklegen (dies entspricht einer Strecke von rund 1'700 km mit einem Energieäquivalent von 1 Liter Benzin).

Durant l'année 2003, ce sont près de 620 projets qui ont été soutenus par les divers programmes de recherche énergétique de l'OFEN. Les moyens ainsi engagés – au total quelque 35 MCHF, soit 23 MCHF pour les projets de recherche et développement (R+D) et 12 MCHF pour les projets pilotes et de démonstration (P+D) – ont été multipliés par le soutien d'autres institutions de recherche et d'autres organismes de soutien et de l'économie privée. La recherche et le développement, les installations pilotes et de démonstration, ainsi que les mesures d'encouragement à l'introduction sur le marché, réalisées dans le cadre des actions de *SuisseEnergie*, ont continué à être une coopération fructueuse en 2003.

Le choix ci-dessous de projets exemplaires illustre l'importante compétence en matière de recherche qui existe en Suisse, mais aussi l'engagement des chercheurs et de l'industrie dans la quête de solutions innovantes pour améliorer notre approvisionnement énergétique et dans leur disponibilité à nouer des collaborations internationales. 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, les articles spécifiques de la revue ENET-News, ceux de l'EPF de Lausanne et de l'EPF de Zurich, du PSI, du LFEM / EMPA. Quant aux efforts de transfert, y compris les activités d'ENET, on trouve également des informations dans les rapports annuels de *SuisseEnergie*.

UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE

Les travaux de recherche touchant à l'utilisation rationnelle de l'énergie dans les Bâtiments ont servi de guides pour introduire des **standards pour les bâtiments**, tel *Minergie* ou la *Maison passive*. En voici un exemple, comme projet P+D : une maison familiale de 8 ménages à Stans qui remplit un standard en matière de demande énergétique, à savoir 120 kWh/(m² a).

L'an passé un **véhicule à hydrogène** a pris part pour la première fois à l'*Éco-Marathon Shell* à Nogaro, dans le sud de la France : il s'agit du **PAC-Car** qui a été développé conjointement par l'EPF de Zurich, le PSI et l'Université de Valenciennes. Le moteur électrique tire son courant électrique d'une pile à combustible à hydrogène. Le véhicule extrêmement léger, monoplace, peut embarquer 15 grammes d'hydrogène dans un *getter* à hydrure métallique qui lui a permis de couvrir une distance de 90 km (cela correspond à un parcours de 1'700 km avec un équivalent énergétique de 1 litre d'essence).

In den zwei Themenfeldern **dezentrale Strom-Erzeugung in Verteilnetzen** und **Druckluft als Elektrizitätsspeicher** zeichnet sich die **Bildung von Kompetenzzentren** an den Fachhochschulen Biel respektive Luzern ab. Damit werden gute Voraussetzungen für die Erarbeitung neuer Konzepte bei der Flexibilisierung des Strom-Verteilnetzes und damit für die verstärkte Einführung erneuerbarer Energien geschaffen.

Für die **Erhöhung der Jahresarbeitszahl und die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen** sind die optimale Einbindung der Anlage ins Gebäudesystem sowie die Standardisierung von grosser Bedeutung. Sieben gängige Standardschaltungen in optimierter Form wurden vermessen und die Datensätze öffentlich zugänglich gemacht. Damit besteht für Entwickler und Planer von Wärmepumpen-Systemen die Möglichkeit, diese Erfahrungen in konzentrierter Form zu nutzen.

In Yverdon betreibt *HTceramix* eine **Pilot-Produktionsstätte für Festoxid-Brennstoffzellenstapel**. Es wird angestrebt, den Ausstoss der Zellen in guter Qualität von heute 10 auf 100 pro Woche erhöhen. Mit der Anlage soll auch die Kostenreduktion für die künftige Massenherstellung von Brennstoffzellen abgeschätzt werden. Die produzierten Zellen sollen den Bedarf für die Demonstration der Technologie bei interessierten industriellen Anwendern abdecken.

Die Arbeiten des PSI zur Verminderung der NO_x-Emissionen bei mobilen Dieselmotoren mittels selektiver katalytischer Reduktion (SCR) durch Harnstoff tragen Früchte. Da im Jahr 2005 die strenge EURO IV-Abgasnorm in Kraft tritt, haben **mehrere Firmen mit dem PSI Forschungskooperationsverträge abgeschlossen**. Unter anderem beschäftigen sich die deutschen Firmen *Wacker AG* mit der Markteinführung der PSI-SCR-Technologie und *Umicore* finanziert am PSI eine Dissertation zur Suche nach neuen SCR-Systemen.

ERNEUERBARE ENERGIEN

Im Bereich *Solarthermie* wurden an der EPF-Lausanne neuartige, farbige Verglasungen für **Sonnenkollektoren** entwickelt. Diese farbigen Kollektoren bieten bei der architektonischen Gestaltung neue, attraktive Möglichkeiten. Die Herstellung der Gläser basiert auf der Ablagerung von interferierenden SiO₂-Schichten von 30 bis 150 nm Dicke auf ein Trägerglas, wodurch die Transmission des Lichts lediglich um weniger als 8% abgeschwächt wird. Dieses Verfahren wurde im Berichtsjahr patentiert. Eine Technik zur homogenen Beschichtung von grossen Flächen wird zusammen mit der Universität Basel entwickelt.

Dans le domaine de l'*Utilisation rationnelle de l'électricité*, deux thèmes sont particulièrement importants: la **production décentralisée d'électricité** et l'**air comprimé comme stockage d'électricité**. Deux **centres de compétences se sont développés** pour ces thèmes : la HES de Bienne et celle de Lucerne. Ainsi sont établies de bonnes conditions pour l'élaboration de nouveaux concepts lors de la flexibilisation du réseau de distribution d'électricité et, par là, pour une pénétration accrue des sources d'énergie renouvelables.

L'intégration optimale des pompes à chaleur (PAC) dans le système du bâtiment et leur standardisation sont importantes pour une **élévation du coefficient de performance annuel et pour l'amélioration de la rentabilité des ces PAC**. Sept schémas de connexion de forme optimale ont été mesurés et les résultats qui en sont issus ont été rendus publics. Ainsi les développeurs et concepteurs de systèmes de PAC ont-ils maintenant la possibilité de disposer de ces expériences sous une forme ramassée.

À Yverdon, *HTceramix* a mis en route une **production-pilote d'éléments de piles à combustible à oxyde céramique solide**. Il est prévu d'arriver à passer de 10 (actuellement) à 100 par semaine le nombre produit des éléments de piles, tout en garantissant leur bonne qualité. Grâce à cette installation, il sera possible d'estimer les coûts de fabrication pour une future production en masse. Les piles produites devront satisfaire aux besoins des applications industrielles en tant que démonstration de cette technologie.

Les travaux du PSI dans le domaine de l'abaissement des émissions de NO_x des moteurs diesel mobiles grâce une réduction catalytique sélective (SCR) au moyen de l'urée, ont porté leur premiers fruits. Comme la norme des gaz d'échappement européenne EURO IV entrera en vigueur en 2005, **plusieurs firmes ont passé des contrats de coopération de recherche avec le PSI**. Entre autres, la firme allemande *Wacker AG* s'occupe de l'introduction sur le marché de la technologie SCR, et *Umicore* soutient un travail de thèse au PSI investiguant de nouveaux systèmes SCR.

SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLES

Dans le domaine de l'*Utilisation thermique de l'énergie solaire* on relèvera un développement original qui s'est déroulé à l'EPFL : une réalisation **de vitrages solaires de couleur**, permettant de développer des capteurs solaires de différentes teintes. La coloration des verres permettra en outre d'avoir des débouchés intéressants en architecture. L'approche du LESO est le dépôt de couches minces d'interférence à base de SiO₂ de 30 à 150 nm d'épaisseur et cela en ne pénalisant la transmission de la lumière qu'à moins de 8%. Ce procédé a permis de déposer un brevet en 2003. Le développement permettant de faire des dépôts exactement colorés sur de grandes surfaces se fera avec une collaboration avec l'Université de Bâle.

Die Universität Neuenburg prägt in der **Photovoltaik** die Führungsposition im wissenschaftlichen Umfeld der Dünnschicht-Silizium-Zellen. Im Berichtsjahr gelang ein **wichtiger Technologie-Transfer**, indem mit der Firma *Unaxis* ein Kooperationsvertrag abgeschlossen werden konnte. Mit der firmeneigenen Geschäftseinheit *Unaxis solar* wird in Neuenburg ein Industrielabor für Depositionsanlagen von Solarzellen aufgebaut. Die Kooperation wird in einem KTI-Projekt vertieft, welche die Entwicklung einer grossflächigen, schnellen Beschichtungsanlage zum Ziel hat und an dem zusätzlich die EPF-Lausanne beteiligt ist.

Die Schweiz ist **bei der solarthermischen und bei der photoelektrokatalytischen Wasserspaltung zur Wasserstoffproduktion** international führend. Die Umsetzung der Resultate gestaltet sich aber schwierig, da geeignete Industriepartner sehr zurückhaltend sind. Mit dem vom PSI bearbeiteten Projekt zur solarthermischen Produktion von Zink, konnten die chemischen und thermodynamischen Bedingungen charakterisiert werden, womit die solare Produktion der industriell interessanten Produkte Wasserstoff und Synthesegas via Zink auf effiziente Weise und in einem regenerativen Kreislauf ermöglicht wird.

Zusammen mit dem Verband *Schweizerischer Hersteller und Importeure für Holzfeuerungen*, dem Ökozentrum Langenbruck und der Fachhochschule Zentralschweiz wurde an der Fachhochschule beider Basel eine **akkreditierte Prüfstelle für Holzfeuerungen** eingerichtet. Der Kontakt zu Normengremien ist stetig erhöht worden. Durch das systematische Sammeln von Erfahrungen kann die Qualität von Anlagen sichergestellt werden. Dies dient einer vermehrten Verbreitung der Technologie.

Im Zentrum von Würenlos wird eine 170 kW-**Grundwasser-Wärmepumpe** installiert, welche als innovative Komponente eine **Kleinturbine zur Stromrückgewinnung** durch das aus 50 m Erdtiefe hochgepumpte Wasser beinhaltet. Von dieser Kombination verspricht man sich eine Reduktion der Betriebskosten. Falls das Konzept erfolgreich ist, könnte es für Grossanlagen richtungweisend werden.

Zur Verbesserung der Akzeptanz der Windenergie in der Schweiz haben die Ämter BFE, BUWAL und ARE mit Akteuren der Natur- und Landschaftsschutzorganisationen sowie der Elektrizitäts- und Windbranche ein **Konzept der Windenergie Schweiz** ausgearbeitet. Unter Berücksichtigung der Kriterien dieses Konzepts und der meteorologischen Bedingungen wurden 40 prioritäre Standorte gefunden, an denen die Installation von Windturbinen sinnvoll und verträglich ist und jährlich theoretisch 500 GWh Strom gewonnen werden könnten.

L'Université de Neuchâtel est le *leader* dans le domaine des cellules **photovoltaïques** en couche mince à base de silicium. Dans l'année sous revue, un important **transfert de technologie** a été réalisé lors duquel un contrat de coopération a pu être conclu avec la firme *Unaxis*. L'unité *Unaxis solar* va développer à Neuchâtel un laboratoire industriel pour des installation de dépôt de couches minces pour cellules photovoltaïques. La coopération est renforcée dans un projet CTI qui envisage le développement d'une installation de dépôt de couche rapide et de grande surface, projet auquel participe aussi l'EPF de Lausanne.

La Suisse est pionnière dans le domaine de la **production d'hydrogène par photolyse de l'eau, quelle soit due à la chaleur solaire ou à la catalyse photoélectrique**. Le transfert des résultats à la pratique n'est pas facile, car les partenaires industriels sont encore réticents. Un projet du PSI a permis de caractériser les conditions chimiques et thermodynamiques de la production de zinc par la voie solaire thermique. Par là, la production d'hydrogène et de gaz de synthèse via le zinc par voie solaire a été rendue possible de façon efficace et en un cycle régénératif.

L'Ökozentrum Langenbruck et la HES de la Suisse centrale, en collaboration avec l'Association des *Producteurs et Importateurs suisses de chauffages à bois*, ont mis sur pied un **service d'accréditation pour chauffages à bois** dans la HES des deux Bâle. Le contact avec les institutions de normalisation est assuré de façon que les expériences soit rassemblées et que la qualité des installations soit garantie. Cela sera utile pour une large dissémination de cette technologie.

Au Centre de Würenlos se trouve une **pompe à chaleur** de 170 kW **à partir de l'eau profonde** qui est équipée d'une **petite turbine pour la récupération d'électricité** à partir de l'eau pompée à 50 m. Grâce à cette combinaison on s'attend à une réduction des frais d'exploitation. Dans le cas où ce concept se révèle fructueux, il pourrait devenir un modèles pour de plus grandes installation.

Les Offices fédéraux de l'énergie, de l'environnement, des forêts et du paysage, et de l'aménagement du territoire ont établi un dialogue avec les acteurs des organisations de protection de la nature et du paysage, ainsi qu'avec les branches de l'électricité et de l'énergie éolienne, cela en vue de l'amélioration de l'acceptance de cette dernière en Suisse. Un **Plan directeur de l'énergie éolienne en Suisse** a été élaboré. En tenant compte des critères de ce *Plan directeur* et des conditions météorologiques, 40 emplacements prioritaires ont été repérés sur lesquels on pourrait théoriquement produire 500 GWh d'électricité par année.

In Mettental soll ein **Ultra-Hochdruck-Trinkwasser-Kraftwerk** realisiert werden, welches das Wasser nach einer Fallhöhe von 900 m in einer Stufe turbiniert und damit jährlich voraussichtlich 830 MWh Strom produziert. Durch die einstufige Nutzung wird die Synchronisation erschwert und der Wirkungsgrad könnte sich verschlechtern, aber durch Einsparungen bei den Erschliessungskosten kann die Wirtschaftlichkeit erhöht werden.

KERNENERGIE

Im Bereich der **thermonuklearen Kernfusion** hat die EPF-Lausanne die Versuche an Materialien mit einer geringen Aktivierbarkeit weitergeführt. Die Experimente konnten dank der Neutronenquelle SINQ des PSI durchgeführt werden. Daneben wurde die neue TORPEX-Anlage in Betrieb genommen, die dem Studium der Physik von toroidal geformten Plasmen und insbesondere von Turbulenzphänomenen dient. Die Anlage wird auch zur Ausbildung von Physikern mit Spezialgebiet Plasmaphysik verwendet.

Bei den Forschungsarbeiten zur **Kernspaltung** wurde in der Phase II des Projekts *PROTEUS* die abbrandbedingte Reduktion der Neutronenmultiplikation (Reaktivitätsverlust) und der Zunahme der Neutronenemission im nuklearen Brennstoff validiert. Die genaue Kenntnis der Kernreaktivität bestimmt die Zykluslänge des Brennstoffs. Dank dem breiten Bereich an Abbrandniveaus und Neutronenmoderations-Bedingungen wurde eine einzigartig experimentelle Datenbasis geschaffen.

Im Bereich **Regulatorische Sicherheitsforschung** konnten sich die schweizerischen Forschungspartner, dank den Arbeiten im internationalen Felslabor *Mont Terri*, über Forschungsarbeiten im Bereich Lagerung von Radioaktiven Abfällen in anderen Ländern informieren. Die Experimente haben auch zum Entsorgungsnachweis der NAGRA beigetragen, welcher die Machbarkeit einer sicheren Endlagerung hochradioaktiven Abfalls im Opalinuston zeigen soll. Die Arbeiten im Felslabor dienen hauptsächlich der Validierung von Modellen und Rechenwerkzeugen an konkreten Datensätzen.

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

In der Studie *Windenergie und schweizerischer Wasserkraftpark* konnte gezeigt werden, dass zwischen den beiden Branchen **Synergien** genutzt werden können. Die Betreiber von Speicher- und Pumpspeichieranlagen können ihre Regelernergie kostendeckend günstiger anbieten als Produzenten mit anderen Technologien. Damit können einerseits Deckungsbeiträge erwirtschaftet werden, die es erlauben, Substanz zu erhalten und unter Umständen auszubauen (insbesondere Ausbau von Turbinen- und Pumpleistung). Andererseits erhalten die Betreiber von Windenergie bei einer Teilnahme der schweizerischen Kraftwerke an den geplanten Regenergiemärkten die benötigte Ausgleichsenergie tendenziell günstiger.

Dans le Mettental a été réalisée une **centrale hydroélectrique à ultra-haute pression** qui turbine de l'eau potable, après une chute de 900 m en une seule étape, et qui devrait produire annuellement quelque 830 MWh d'électricité. Du fait de cette unique étape de chute, la synchronisation est rendue plus difficile et le rendement pourrait en être affecté ; mais grâce à l'économie réalisée dans les coûts d'équipement la rentabilité pourra être améliorée.

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Dans le domaine de la **Fusion thermonucléaire contrôlée** l'EPF de Lausanne, avec son antenne au PSI, a poursuivi ses essais sur le développement de matériaux dits «à basse activation», grâce à la source de neutrons SINQ du PSI. D'autre part, une nouvelle installation, TORPEX, pour la physique des plasmas de forme toroidale a été mise en service pour l'étude des phénomènes de turbulence. Elle est aussi utilisée de façon didactique pour la formation des physiciens spécialisés sur les plasmas.

Dans le domaine de la **fission nucléaire**, le projet PROTEUS a achevé une nouvelle phase consistant à analyser la réduction de la multiplication des neutrons, dite aussi perte de réactivité. Une connaissance exacte de cette donnée détermine la durée du cycle du combustible. Grâce à l'utilisation de combustibles de divers niveaux de combustion et au recours à de l'eau boriquée comme modérateur on a pu constituer une importante base de données expérimentales.

Dans le domaine de la **recherche réglementaire en sécurité nucléaire**, les travaux au laboratoire international d'essai du *Mont-Terri* se sont consolidés et ont été la source d'importantes contributions aux recherches entreprises sur le plan international en matière de stockage de déchets nucléaires. Ils ont aussi contribué à l'établissement de la faisabilité du stockage en Suisse. Les argiles en opaline constituent un milieu favorable à un stockage géologique profond. Les essais du laboratoire servent à valider des modèles et des outils de calcul en produisant des données expérimentales.

FONDEMENTS DE L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE

Dans l'étude *Énergie éolienne et parc suisse des centrales hydroélectriques* on a pu montrer que des **synergies** pouvaient être utilisées entre les deux branches. Les exploitants d'installations de stockage et de pompage peuvent offrir leur énergie de réglage à un prix plus favorable, tout en couvrant leurs coûts, que les producteurs par d'autres technologies. Par là, peuvent, d'une part, être réalisés des revenus marginaux qui leur permettent de maintenir leurs installations et même, selon les circonstances, de se développer (en particulier par des élévations de puissance des turbines et des pompes). D'autre part, les exploitants d'énergie éolienne avec participation des centrales suisses d'électricité peuvent obtenir l'énergie d'équilibrage nécessaire à un prix évoluant de façon plus favorable.

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG IN GEBÄUDEN

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Mark Zimmermann

mark.zimmermann@empa.ch



Wohn- und Geschäftshaus Renggli in Sursee

Das stattliche Gebäude mit rund 11'000 m³ Gebäudevolumen und 4600 m² Energiebezugsfläche wurde in Holzbauweise ausgeführt. Mit einer gewichteten Energiekennzahl *Wärme* von 24.4 kWh/(m²·a) wurde der einzuhaltende *Minergie*-Grenzwert um 41 % unterschritten.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Forschungs-, Pilot und Demonstrationsprogramm **Rationelle Energienutzung in Gebäuden** fördert Projekte, welche den Energiebedarf von Gebäuden reduzieren, eine effizientere Nutzung der Energie für Wärme, Licht und Kraft ermöglichen sowie den Einsatz erneuerbarer Energien unterstützen. In Ergänzung zu den Projekten der Privatwirtschaft und der öffentlichen Forschungsstellen will das Programm gezielt Wissenslücken schliessen, die Weiterentwicklung vielversprechender Technologien fördern und den Stand der Technik für eine verbreitete Anwendung demonstrieren. Energetische Massnahmen sollen vor allem für die Gebäudesanierung, durch Kostensenkungen und Effizienzsteigerungen attraktiver werden.

Das Programm befasst sich zudem mit den Umweltaspekten der Energienutzung und des Bauens. Im Zentrum stehen die Verringerung des Verbrauchs fossiler Energien und des materiellen Ressourcenverbrauchs der Bauwirtschaft.

Das Programm **Rationelle Energienutzung in Gebäuden** unterstützt und erforscht vor allem Technologien, die mittelfristig ein grosses Effizienzpotential aufweisen. Die Optimierung der bestehenden Technologien ist primär Sache der Privatwirtschaft. Verstärkt bearbeitet werden Themen, die der energetischen Gebäudesanierung dienen oder welche die nachhaltige Quartierentwicklung fördern.

Das Programm befasst sich mit **Gebäudesystemen**, mit der **Gebäudehülle**, mit den **haustechnischen Installationen** und mit **der Nutzung der Sonnenenergie**. Im Vordergrund stehen

die **Optimierung ganzer Gebäudesysteme** und die **ganzheitliche Berücksichtigung der Umweltwirkungen**.

Anfangs 2000 wurde das Programm für vier Jahre festgelegt und Projekte wurden öffentlich ausgeschrieben. Eine ergänzende Ausschreibung erfolgte im Jahr 2002. Von zentraler Bedeutung waren dabei:

- **Hochisolationstechnik:** Qualitätssicherung bei der Herstellung und Anwendung von vakuum-isolierten Dämmsystemen, als Alternative zu voluminösen, konventionellen Materialien.
- **Passivhäuser:** Entwicklung von Technologien und Systemen für *Minergie-* und *Passivhäuser*, sowie deren Demonstration im Wohn-, Büro- oder Gewerbebau.
- **Umwelttechnik:** Bereitstellen von Grundlagen sowie Erarbeitung und Anwendung von praxisnahen Methoden zur gesamtheitlichen Beurteilung von Bauten, Systemen und Komponenten.
- **Nachhaltige Quartierentwicklung:** Einbezug gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Aspekte im Sinne einer ganzheitlich nachhaltigen Entwicklung des umbauten Raumes.

Auf diesen Gebieten setzt das Programm massgebende Impulse. Zusammen mit ergänzenden Technologien sollen damit die Voraussetzungen geschaffen werden, dass die Bauwirtschaft mittelfristig in der Lage sein wird, entscheidend zu den Zielen der Nachhaltigkeit und der Klimakonvention beizutragen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

UMWELT / NACHHALTIGKEIT

Energie- und Umwelttechnik haben sehr viel Gemeinsames. Währenddem früher die Reduktion des Energieverbrauchs im Vordergrund stand, richtet sich heute die Energiepolitik primär nach den Kriterien der Nachhaltigkeit. Ein zentrales Ziel der Energieforschung ist deshalb heute die Reduktion der Treibhausgase, welche zur Klimaerwärmung führen sowie die Begrenzung des Schadstoffausstosses.

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 Umweltwirkungen der Energienutzung und der Bauprozesse auf ein vertretbares Mass zu reduzieren.

Einen Meilenstein stellt diesbezüglich die Fertigstellung der Ökoinventar-Datenbank *Ecoinvent 2000* dar, welche seit September 2003 auf dem Internet (www.ecoinvent.ch) verfügbar ist und bereits international grosse Beachtung findet. Diverse Institutionen des ETH-Bereichs haben sich unter der Leitung der EMPA zu einem **Zentrum für**

Ökoinventare zusammengeschlossen, um dieses umfassende und harmonisierte Ökoinventar für Energiesysteme, Investitions- und Konsumgüter, Transporte und Entscheidungsprozesse zu erstellen und zu unterhalten.

Die Unterstützung des BFE konzentrierte sich auf die **Ökoinventare für Energiesysteme** [1] auf **Ökoinventare für Solar- und Heizsysteme** [2] sowie auf **ökologische Aspekte von Lüftungsanlagen** [3], währenddem die Bundesämter für Umwelt Wald und Landschaft (BUWAL), für Bauten und Logistik (BBL) und für Strassen (ASTRA) sich an der Erarbeitung von Ökoinventaren für Bau- und Werkstoffe, für chemische Produkte sowie für Abfall- und Transportprozesse beteiligten.

Mit rund 3'500 gut dokumentierten Datensätzen ist *Ecoinvent 2000* zurzeit die umfassendste und am besten dokumentierte Datenbank für Ökoinventare. Sie stellt die Grundlagen bereit, mit welchen anwendungsorientierte Fragestellungen untersucht werden können.

Ebenfalls abgeschlossen wurde das Projekt **eco-devis** [4], welches eine praxisnahe Planungshilfe für die umweltbewusste Ausschreibung von Bauleistungen ermöglicht. In Zusammenarbeit mit dem Verein *eco-devis* (verschiedene kantonalen und kommunale Hochbauämter und Verbände der Bauwirtschaft) wurden Bauprozesse bezüglich ihrer Umweltverträglichkeit analysiert und in einem sogenannten *eco-devis* als ökologisch vorteilhafte oder weniger vorteilhafte Konstruktion bezeichnet. Damit hat der Bauplaner nun ein Instrument zur Verfügung, welches ihm die Planung umweltfreundlicher Baukonstruktionen erleichtert (www.ecodevis.ch).

Je nach Planungsstadium werden im Bauwesen ganz unterschiedliche Instrumente benötigt, um ökologische Kriterien optimal berücksichtigen zu können. Eine direkte Verbindung der *Ecoinvent*-Daten mit der Bau- und Kostenplanung bietet das **Programm OGIP**, welches im Jahr 2000 mit der Unterstützung des BFE und des BBL eingeführt wurde. Im Moment wird dieses umfassende Instrument für die integrale Ermittlung von Kosten, Energieverbrauch und Umweltbelastung durch private Initiativen vollständig überarbeitet und die Datenbasis den neuen *Ecoinvent*-Daten angepasst. Es wird Mitte 2004 für die Anwender zur Verfügung stehen.

Um auch auf einfache Weise Bauprojekte hinsichtlich ihrer Umweltbelastung beurteilen zu können, wurde gemeinsam mit der *Koordinationsgruppe ökologisch Bauen (KÖB)* ein **Konzept für einen elektronischen Bauteilkatalog** [5] entwickelt. Im Vordergrund steht dabei ein ein-

faches Instrument, welches auf der Basis des *SIA 380/1*-Nachweises und des Bauteilkatalogs neben der energetischen auch eine ökologische Beurteilung eines Projekts zulässt.

Im Gegensatz zur Energiekennzahl, welche gut eingeführt ist, besteht heute noch eine grosse Unsicherheit bezüglich eines Zielwerts für die Umweltbelastung. Im Projekt **Ökologische Optimierung von Solargebäuden über deren Lebenszyklus** [6] werden deshalb auf der Basis von Ökobilanzen, energieeffiziente Gebäude bezüglich ihrer Umweltwirkungen untersucht, um daraus Zielwerte ableiten zu können. Die Untersuchungen werden in Zusammenarbeit mit dem Projekt **Sustainable Solar Buildings** [12a] der Internationalen Energieagentur (IEA) durchgeführt und 2004 abgeschlossen.

Einen ganz neuen Weg gehen vier Projekte, welche sich mit der nachhaltigen Quartierentwicklung befassen. Die Projekte werden zusammen mit dem Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) und den lokalen Behörden und Institutionen durchgeführt und durch *Novatlantis*, der Initiative der ETH-Forschungsinstitute für eine nachhaltige Entwicklung, koordiniert [7]. Ziel der Projekte ist es, die Aspekte der nachhaltigen Entwicklung von einzelnen Gebäude loszulösen und im Kontext ganzer Quartiere zu sehen. Dadurch erhalten die Projekte den notwendigen Bezug zu sozio-ökonomischen Aspekten und zu den Anforderungen bereits gebauter Städte. Im Berichtsjahr wurden die Möglichkeiten und Bedürfnisse für eine **nachhaltige Quartierentwicklung in Basel** [8], **Lausanne** [9], **Luzern** [10] und **Zürich** [11] untersucht. In einer nächsten Phase sollen ausgewählte Massnahmen geplant und später als Pilotprojekte realisiert werden.

PASSIVE SONNENENERGIENUTZUNG / GEBÄUDESYSTEME

Die Förderung energieeffizienter Bauweise und der ausgewogene Einbezug von erneuerbaren Energien ist ein wichtiges Anliegen des Forschungsprogramms. Im Vordergrund stehen Gebäude welche den *Minergie*- resp. den *Minergie-P*- oder den *Passivhaus-Standard* erfüllen.

Das IEA-Projekt **Solar Sustainable Housing** [12a] untersucht, optimiert und demonstriert im internationalen Rahmen Gebäude, welche rund 10 Mal weniger Heizenergie benötigen als konventionelle Bauten. Als erstes wurde nun eine Zusammenstellung der untersuchten Fallbeispiele fertiggestellt, welche demnächst im deutschen *C.F. Müller Verlag* erscheinen soll.

Nebst den technischen Aspekten werden auch sozio-ökonomische Aspekte behandelt. Einerseits werden kostengünstige Lösungen gesucht, andererseits werden Bauherrenbedürfnisse ermittelt. Dazu wird eine **Marktanalyse** [13] durchgeführt, welche die Vorurteile und Wünsche von Bauherrschaften gegenüber Niedrigenergiehäusern resp. *Passivhäusern* abklärt.

Die vielfältigen internationalen **Erfahrungen mit Passivhäusern und Solargebäuden** [12b] mit ähnlich niedrigem Energieverbrauch wurden in einer umfangreichen Sammlung von Fallbeispielen dokumentiert (www.empa-ren.ch/ren/Solar-gebaeude.htm) und in **Strategien zur Nutzung der Sonnenenergie** [14] umgesetzt.

Eine **vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser** [15] wird durch die HTA-Luzern durchgeführt, welche auch Zertifizierungsstelle für Gebäude im *Passivhaus-* resp. *Minergie-P-Standard* ist. Dazu wird eine Anzahl realisierter Demonstrationsgebäude systematisch ausgewertet. Nebst der Energiebilanz interessieren vor allem die Raumluftfeuchtigkeit im Winter und die Benutzerzufriedenheit.

Für die noch wenig bekannten Luftkollektorsysteme wurde 2003 eine **Planungsrichtlinie für solare Luftheizsysteme** [16] erstellt. Sie fasst die Erkenntnisse aus einem früheren IEA-Projekt und aus in der Schweiz gebauten Anlagen zusammen. Das Planungshilfsmittel wird im Frühjahr 2004 unter dem Titel **Solare Luftheizsysteme** im deutschen *Ökobuch Verlag & Versand GmbH* erscheinen.

Eine Art **Luftkollektoren, kombiniert mit Photovoltaik** [17] untersuchte die ETH Zürich. Da Photozellen nur etwa 15 % der Einstrahlung in elektrische Energie umwandeln, liegt es nahe, auch die anfallende Wärme zu nutzen. Das Projekt untersuchte, inwiefern sich das Angebot an Wärme bezüglich Menge, Temperaturniveau und Verfügbarkeit mit geeigneten Systemen nutzen liesse. Die Ergebnisse zeigen, dass kombinierte thermisch-photovoltaische Kollektoren praktisch nur sinnvoll sind, wenn geeignete Abnehmer für Niedertemperaturabwärme vorhanden sind. Dies könnte beispielsweise durch einen grossen Bedarf zur Warmwasservorwärmung (Hotels) oder die Luftvorwärmung für Wärmepumpen in alpinen Regionen gegeben sein (www.empa-ren.ch/ren/Hybridkollektor.htm).

Ebenfalls mit der Nutzung der Sonnenenergie befassen sich drei Projekte aus der Westschweiz:

- Die EPF-Lausanne untersucht das **Solarpotential von Städten** [18a] anhand von drei

exemplarischen Quartieren: einer dichten Blockrandbebauung im Zentrum Basels, eine genossenschaftliche Wohnsiedlung am Rand von Lausanne sowie ein gewerbliches Entwicklungsgebiet in Meyrin bei Genf. Ziel der Arbeit ist es, das realistische Potential von Sonnenkollektoranlagen, Photovoltaikanlagen und der Tageslichtnutzung in typischen städtischen Quartieren zu ermitteln.

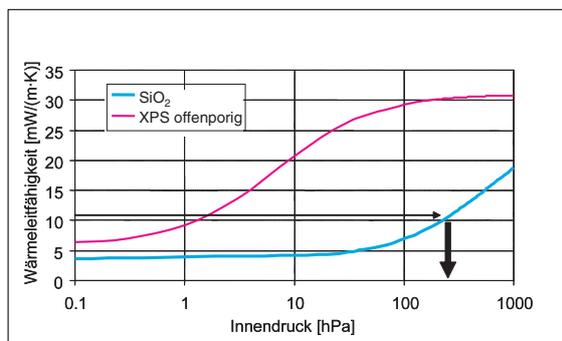
- Die EPF-Lausanne beteiligt sich am IEA-Projekt **Optimierung der Tageslichtnutzung in Gebäuden** [18b]. Das Ziel ist die Erarbeitung von technischen Lösungsvorschlägen für eine effiziente Kunst- und Tageslichtnutzung. Die EPFL konzentriert sich dabei auf die Tageslichtnutzung und die intelligente Regelung des Sonnenschutzes, welche selbstlernend die Benutzerwünsche berücksichtigt.

Neu in das Forschungsprogramm aufgenommen wurden Rechenprogramme, welche auf einfache Weise die Optimierung von Gebäudekonzepten ermöglichen sollen. Durch die hohe Leistungsfähigkeit moderner PC ist es – eine einfache Benutzerführung vorausgesetzt – auch für den Planer möglich, mit wenig Aufwand komplexe dynamische Simulationen durchzuführen und für seine Gebäudeoptimierung zu nutzen. Die drei Berechnungsprogramme **bSol** [19], **Klimaflächenmethode** [20] und **Helios-Hygro** [21] stellen eine Ergänzung zur Energiebedarfsrechnung gemäss *SIA 380-1* dar. Sie dienen in erster Linie dazu, im frühen Planungsstadium differenzierte Analysen – auch bezüglich Kühllasten – durchzuführen und konzeptionelle Entscheide zu fällen. Das Programm *bSol* (zweisprachig f/d) ist bereits erhältlich (www.bsol.ch), die beiden anderen werden im Laufe 2004 erscheinen.

Eine Vereinfachung der Planung von *Minergie*-Bauten wurde mit drei Projekten angestrebt, die abgeschlossen wurden. Mit der **Definition von Zusatzanforderungen zu den MINERGIE®-Standards** [22] wurden die *Minergie*-Anforderungen auf alle Gebäudekategorien gemäss *SIA 380/1* erweitert und in den Nachweisformularen entsprechend berücksichtigt. Entsprechend wurde dazu auch ein **Berechnungstool für einfache Lüftungsanlagen** [23] entwickelt, um den Nachweis für das Lüftungssystem zu unterstützen. Zur weiteren Vereinfachung des *Minergie*-Nachweises wurden zudem **Standardlösungen für den Minergie-Standard** [24] definiert, welche analog dem Einzelbauteilnachweis gemäss *SIA 380/1* die Einhaltung des *Minergie*-Standards auch ohne Systemnachweis garantieren.

GEBÄUDEHÜLLE

Einen mehrjährigen Schwerpunkt des Programms stellen **Vakuumisolationen** dar, welche die Dämmdicke bei gleicher Leistung um einen Faktor 5 bis 10 reduzieren. Diese Technik ist für die Baubranche von besonderem Interesse, weil durch den geringeren Platzbedarf neue technische Lösungen und Entwicklungen möglich sind. Vor allem für Gebäudesanierungen und für die Isolation von Haustechnikapparaten und -geräten, ist die Platzfrage oft entscheidend. Die Nachfrage nach Vakuumdämmungen hat deshalb sehr rasch zugenommen, obwohl noch diverse Fragen, insbesondere zu deren Lebensdauer, nicht vollständig geklärt sind.



Figur 1: Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von pyrogener Kieselsäure (SiO_2) und offenporigem Polystyrol-Dämmstoff. Bei der Kieselsäure kann aufgrund des nanostrukturierten Aufbaus der Innendruck rund 100-fach höher ansteigen als beim mikroporösen Polystyrolschaum, bevor die Wärmeleitfähigkeit den Grenzwert von 11 mW/(m·K) überschreitet. Dadurch kann vom Vakuum-Paneel eine Lebensdauer von über 50 Jahren erwartet werden.

Die Schweiz führt das IEA-Projekt **High Performance Thermal Insulation in Buildings** [25a] an, mit welchem vor allem die Praxistauglichkeit dieser Dämmsysteme verbessert werden soll. Die Schweiz beteiligt sich zudem mit verschiedenen internationalen Projekten an der Erarbeitung von Grundlagen und von Prüfmethode zur **Qualitätssicherung** [26a] sowie an der **Entwicklung neuer Anwendungen** [8b]. Die Schwachstellen und physikalischen Besonderheiten dieser Hochisolationssysteme sind heute so gut bekannt, dass die Systemparameter auf eine theoretische Lebensdauer von ca. 50 Jahren ausgelegt werden können (vgl. Figur 1). Dabei kann bei korrekter Verlegung mit einer durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeit von ca. 8 mW/(m·K) gerechnet werden (bei 0.3 mW/(m·K) des evakuierten Materials ohne Plattenstösse). Trotz dieser ermutigenden

Resultate sind noch weitere, umfangreiche Entwicklungsschritte nötig, bis Hochisolationssysteme wirklich baustellentauglich sind.

Die **Wärmelasten transparenter Bauteile und Sonnenschutzsysteme** [26b] wurden an typischen Fassadensystemen am Solarprüfstand der EMPA gemessen und deren Charakteristik im Rahmen des IEA-Solar-Projekts 27 modelliert. Die Modelle werden in einem nächsten Schritt in Gebäudesimulationsprogramme (*TRNSYS*, *Helios*) integriert.

Nebst dem Wärmeschutz und den solaren Gewinnen ist die Luftdichtheit eine wesentliche Eigenschaft der Gebäudehülle. Vor allem bei einer mechanischen Lüftung mit Wärmerückgewinnung ist entscheidend, dass kein grosser Luftaustausch über die Undichtheiten der Gebäudehülle erfolgt. Bei *Passivhäusern* resp. *Minergie-P*-Gebäuden dient die Luftdichtheitsmessung aber auch als wichtiges Instrument zur Qualitätskontrolle. Ein Luftwechsel von 0.6 darf bei einem Überdruck von 50 Pascal nicht überschritten werden. Diese Anforderung ist so hoch, dass die Messung oft schwierig und nicht genügend genau ist. Mit dem Projekt **Messung und Beurteilung der Luftdichtheit von Niedrigenergiehäusern** [27] wird deshalb die Messtechnik so verbessert und vereinfacht, dass sie sich zur Abnahme von Niedrigenergiehäusern eignet. Die bisherigen Arbeiten zeigen, dass auf der Basis der *Blower-Door*-Messung die besten Ergebnisse erzielt werden können. Die Verwendung der hauseigenen Lüftungsanlage anstelle der *Blower-Door* ergibt leider kaum befriedigende Resultate, da der erzeugte Druck sehr gering (ca. 10 Pascal) und die geförderte Luftmenge zu wenig genau bekannt sind.

HAUSTECHNIK

Das Programm *Rationelle Energienutzung in Gebäuden* befasst sich mit der optimalen Integration haustechnischer Systeme ins Gebäude. Die Entwicklung und Optimierung haustechnischer Komponenten wird vor allem durch andere Forschungsprogramme übernommen. Zwei wichtige Projekte befassen sich deshalb mit der Kompetenz des Bauherrn und des Betreibers.

- Im Projekt **Bestellerkompetenz im Bereich Gebäudetechnik** [28] werden die Erkenntnisse professioneller Bauherrn und Planer in einem Handbuch zusammengefasst. Das elektronische Handbuch enthält auch eine Reihe von Formularen, welche den Bauherrn grösserer Anlagen befähigen, die Anforderungen an die haustechnischen Anlagen korrekt zu formulieren.

ren und zu dokumentieren. Dies erleichtert die Kommunikation mit seinen Fachplanern wesentlich. Das Handbuch wird ab Mitte 2004 zur Verfügung stehen.

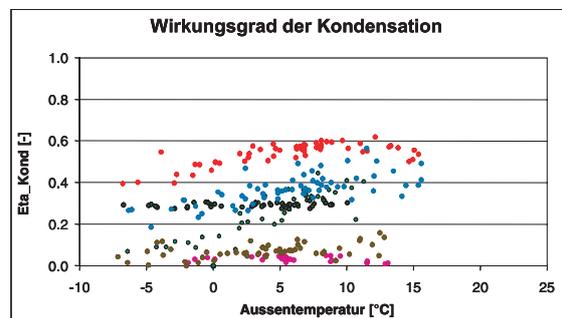
- Das zweite Projekt befasst sich mit der **Betriebskompetenz**, die zwar auch schon bei der Bestellung wichtig ist, die aber speziell den optimalen Betrieb komplexer haustechnischer Anlagen sicherstellen soll. Es zeigt sich immer wieder, dass viele technische Anlagen nicht mit der notwendigen Sorgfalt in Betrieb genommen und betrieben werden und deshalb hohe Energieverluste verursachen. Die Arbeiten werden in internationaler Zusammenarbeit im Rahmen des IEA-Projekts **Commissioning of Building HVAC Systems for Improved Energy Systems** [29] durchgeführt.

Neue Impulse für die Haustechnik ergeben sich aufgrund der *Passivhaus*-Technologie, welche durch den geringen Wärmebedarf neue Anforderungen und Möglichkeiten an die haustechnischen Systeme stellt.

- Vermehrt kommen integrierte Energiezentralen – sogenannte Kombigeräte – zum Einsatz, welche das Haus nicht nur belüften, sondern auch beheizen und das Warmwasser bereitstellen. An der HTA Luzern wurde ein **Prüfstand für Kombigeräte** [30] aufgebaut, womit nun die komplexen Anforderungen, welche an diese Geräte gestellt werden, getestet und weiter entwickelt werden können.
- Ein Interesse besteht auch wieder für **Warm-luftheizungen in Passivhäusern**. Durch den geringen Wärmebedarf genügt sehr oft die Lüftungsanlage, um dem Haus die benötigte Heizwärme zuzuführen. Dies vereinfacht die Haustechnik wesentlich, stellt aber gleichzeitig hohe Anforderungen an die Planung und Ausführung. Um zu erreichen, dass die neuen Möglichkeiten für Warmluftheizungen optimal genutzt werden, wurde eine **Planungsrichtlinie** [31] erarbeitet, welche auch die Problematik von Holzöfen in Niedrigenergiehäusern behandelt.

Mit einer schon fast klassischen Heizungstechnik befasst sich das Projekt **Feldanalyse von kondensierenden Gas- und Ölfeuerungsanlagen**

[25b]. Das Projekt will vor allem die Frage klären, ob es sich überhaupt lohnt, kondensierende Heizgeräte einzusetzen. Dazu wurden 12 kondensierende Öl- und Gasheizkessel im realen Einsatz untersucht. Von besonderem Interesse waren die reale im Verhältnis zur theoretisch möglichen Kondensatmenge sowie der durch die Kondensation zusätzlich bedingte Stromverbrauch für die Abgasventilation. Die Ergebnisse sind hoch interessant: die Kondensatmenge ist in der Realität meist wesentlich geringer als erwartet (vgl. Figur 2) und bei den Ölheizungen wider Erwarten nicht schlechter als bei den Gasheizungen.



Figur 2: Kondensationswirkungsgrade von 6 typischen Heizkesseln. Die max. Kondensation beträgt ca. 60%, die durchschnittliche Kondensationsmenge liegt knapp unter 20% der theoretisch möglichen. Sowohl bei Gas- wie bei Ölkondensationskesseln wurden gute und schlechte Werte gemessen.

Neben dem Heizenergieverbrauch nimmt das Warmwasser eine immer wichtiger werdende Position ein. Trotzdem gibt es noch keine verbindlichen Richtlinien für die energetische Auslegung von Warmwasseranlagen. Die Norm *SIA 380/1* konzentriert sich allein auf den Heizenergiebedarf. In einem neuen Projekt soll nun eine **Methode zur Berechnung des Jahresenergieverbrauchs von Warmwasseranlagen** [32] erarbeitet werden. Die Methode soll die Grundlage schaffen, um bei der Planung der Anlagen Optimierungen vornehmen zu können. Die Methode soll in der ersten Hälfte 2004 fertiggestellt, anschliessend evaluiert und schliesslich in ein EDV-Werkzeug umgesetzt werden.

Nationale Zusammenarbeit

Von den laufenden 37 vom BFE unterstützten Forschungsprojekten wurden 11 Projekte mit **Fachhochschulen**, 12 Projekte mit **ETH-Instituten** und 8 Projekte mit der **Industrie** durchgeführt. An 25 Projekten waren planende **Ingenieurbüros** beteiligt und in 5 Projekten wurde mit **Brancheverbänden** zusammengearbeitet.

Die Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen findet vor allem im Umweltbereich statt. Die Aktivitäten werden im Rahmen der **Koordinationsgruppe des Bundes für Energie- und Ökobilanzen** abgesprochen, in welcher nebst dem BFE das BUWAL, das BBL und das ASTRA, aber auch der SIA vertreten sind.

Eine neue Zusammenarbeit konnte mit dem ARE etabliert werden. Das ARE ist einerseits zuständig für die Nachhaltigkeitspolitik des Bundes, es befasst sich aber auch ganz konkret mit Entwicklungsfragen des umbauten Raumes. Deshalb findet mit dem ARE eine enge Zusammenarbeit im Bereich **nachhaltige Quartierentwicklung** statt.

Eine weitere Zusammenarbeit mit verschiedenen Bundesämtern ist auf dem Gebiet der externen Kosten geplant. Im laufenden Jahr wurden Vorarbeiten geleistet, welche die entsprechenden Aktivitäten der Bundesämter koordinieren und den Handlungsbedarf definieren. Die externen Kosten sollen systematisch und möglichst vollständig für alle in *Ecoinvent* erfassten Prozesse bestimmt werden. Mittelfristig erhofft man sich daraus Instrumente, welche die Verknüpfung von Wirtschafts- und Umweltmodellen besser zulassen.

Primär auf technischer Ebene konnten unter der Leitung der HTA-Luzern durch die Gründung des nationalen Kompetenznetzwerks **brenet** (*Building and Renewable Energies Network of Technology*, www.brenet.ch) die Zusammenarbeit zwischen den Fachhochschulen und mit der KTI verbessert sowie die Kontakte mit der Industrie intensiviert werden.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit könnte mit dem Abschluss des Forschungsabkommens der Schweiz betreffend das 6. Rahmenprogramm der EU neuen Schwung erhalten. Allerdings favorisiert die EU momentan ganz offensichtlich neue Energietechnologien wie Wasserstoffwirtschaft, Brennstoffzellen etc., währenddem für den gesamten Gebäudebereich eigentlich nur die Demonstrationsprogramme **Ecobuildings** und **Concerto** offenstehen.

Zurzeit laufen noch die Vertragsverhandlungen für das Projekt **SUBURET (Advanced Concepts for Sustainable Building Retrofit)**, welches durch die Schweiz initiiert wurde. Es will fortschrittliche Gebäudesanierungskonzepte (*Minergie* bis *Passivhaus/Minergie-P*) europaweit propagieren und demonstrieren.

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 fünf Projekten engagiert:

- **Performance assessment of solar building envelope components**, SHC Task 27, Abschluss 2004 (verlängert) [26b]
- **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, Abschluss 2004 [29]

Neu in Vorbereitung ist die Teilnahme an drei weiteren IEA-Projekten:

- **Whole building heat, air and moisture response (MOIST-ENG)**, BCS Annex 41
- **Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems**, BCS Annex 42
- **Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools**, SHC Task 34

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Schwerpunkte waren wiederum die Wohnbauten, sei es als Neubau oder als Sanierung. Dank dem Marketing von *Minergie* ist es im Sog des *Passivhaus*-Standards gelungen, den Bekanntheitsgrad von *Minergie-P* deutlich zu steigern.

GEBÄUDESTANDARDS

P+D-Projekte im Gebäudebereich waren Wegbereiter für die Einführung von Gebäudestandards in der Schweiz. Dies war beim *Minergie*-Label und auch beim *Passivhaus*-Standard der Fall. Nachdem nun die Differenzen bei der Abgrenzung vom bereits bekannten *Passivhaus*-Standard zum *Minergie-P*-Standard ausgeräumt sind, wird auch dieser Gebäudestandard als Messlatte und Qualitätslabel anerkannt.

Die letzten Vorläufer des *Minergie*-Labels konnten erfolgreich abgeschlossen werden und beweisen mit den Erfolgskontrollen ihre Qualitäten. Das Projekt ***Synergiepark für erneuerbare Energien*** [33] in Gams war so erfolgreich und löste dank dem *Solarpreis* ein so grosses Interesse aus, dass eine **Datenerfassung** bewilligt wurde, welche seit Frühjahr 2003 aktuelle Daten des Gebäudes für jedermann zugänglich macht. Die erfassten Tages-, Monats- und Jahresdaten können über die täglich aktualisierte Internetseite www.synergiepark.ch online abgerufen werden.

Nicht ganz so erfolgreich war das Projekt ***Niedrigenergiehaus Erlenbach*** [34]. Nach regulärem Abschluss der ersten Messkampagne wurden Betriebsoptimierungen durchgeführt. Leider liegt der Energieverbrauch immer noch zu hoch. Der Bauherr untersucht zusammen mit der EMPA die Ursache für die Abweichung vom prognostizierten Wärmeverbrauch. Eine Antwort ist nach den Auswertungen der Betriebsweise der Lüftungsanlage nach der Heizperiode 2003/04 zu erwarten.

Das ***Wohn- und Geschäftshaus Renggli in Sursee*** [35] ist ein mehrgeschossiges Gebäude in Holzbauweise. Aufgrund der Lage im Zentrum von Sursee mit hohen architektonischen Anforderungen und wegen der schwierigen Grundstücksbedingungen konnte das Gebäude nicht so kompakt gebaut werden, dass es den *Passivhaus*-Standard erreicht. Der *Minergie*-Standard wurde jedoch um 41 % unterschritten. Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten lagen innerhalb der von der Bauherrschaft geforderten Bandbreite und auch die erhöhten Anforderungen an den Schallschutz wurden erreicht (s. Titelseite Programmbericht).

Ein neuer Weg wird mit dem Projekt ***Sunfactory in Tramelan*** (Berner Jura) beschritten. Um den Wildwuchs von einzelnen Gewerbebauten einzudämmen und gleichzeitig die Energie optimal zu nutzen, soll unter einer gemeinsamen Glashülle ein ganzes Gewerbequartier entstehen. Die Glashülle dient dabei als Träger für die Photovoltaikanlage und bietet eine grosszügige, witterungsgeschützte Zwischenklimazone. Mit einem Vorprojekt [36] wird nun ermittelt, unter welchen Bedingungen Energieverbrauch und Nutzungskomfort optimiert werden können.

Mit dem Projekt ***Low energy housing in Ticino (The Vitali-Velti house)*** [37] in Monte Carasso bei Bellinzona soll die Zusammenarbeit mit dem Tessin verbessert werden. Das Doppeleinfamilienhaus unterschreitet den *Minergie*-Standard von 42 kWh/(m²·a) um 20 %. Beim einen Hausteil könnte der *Passivhaus*-Standard erreicht werden, wenn die Wärmerückgewinnung der Lüftungsanlage über 80% betragen würde. Die Wohnungen verfügen über eine Holzheizung und Sonnenkollektoren. Dank aussenliegendem Sonnenschutz und Nachtlüftung lagen die Temperaturen auch im Sommer innerhalb des Komfortbereichs.

MINERGIE®-P resp. Passivhausstandard

Im Berichtsjahr konnten drei Projekte abgeschlossen werden, welche zum Ziel hatten, den *Passivhaus*-Standard zu erreichen. Der ***1. Schweizerischer Wohn- und Gewerbebau im Passivhaus-Standard*** (Rapperswil) [38] genügt dem *Passivhaus*-Standard im realen Betrieb nicht ganz. Das Verhalten der Mieter zeigt, dass für einen erfolgreichen Betrieb auch das Verständnis für das Zusammenspielen der verschiedenen Techniken vorhanden sein muss. Forderungen nach erhöhten Raumlufttemperaturen wirken sich negativ auf den Energieverbrauch aus.

Acht-Familien Passivhaus Im Wechsel (Stans) [39]: Dieses Projekt kann als erstes wirklich gelungenes Beispiel gelten. Der *Passivhaus*-Standard für den Primärenergieverbrauch von max. 120 kWh/(m²·a) wird eingehalten, übersteigt jedoch den Planungswert von 75 kWh/(m²·a) deutlich. Der Heizwärmebedarf von 18 kWh/(m²·a) übersteigt den Planungswert von 14.2 kWh/(m²·a) um 27 %. Die Werte im realen Betrieb können jedoch als ausgezeichnet betrachtet werden, da der Heizenergiebedarf den Grenzwert aus dem *Passivhaus-Planungspaket* nicht markant überschreitet.

Die Erfolgskontrolle beim **Passiv-MFH Stämpfli** (Unterägeri) [40] zeigt, dass die Vorgaben im *Passivhaus-Projektierungspaket* auch in Planung und Umsetzung streng zu beachten sind, damit der ehrgeizige Standard auch erreicht werden kann. Die Hanglage in Ägeri erforderte eine Einstellgarage für die PW. Diese ist unter den Wohnteil eingeschoben und trägt einen Grossteil der Lasten des Gebäudes. Wärmebrücken liessen sich zwar minimieren, jedoch nicht vermeiden. Das Zusammenspiel der Haustechnikkomponenten (modulierende WKK, Solarkollektoren) wurde während der Erfolgskontrolle untersucht. Der vom *Passivhaus-Institut* in Darmstadt definierte Grenzwert für Primärenergie wird mit $116 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ um 7 % unterschritten. Allerdings konnte der Grenzwert nur unter Berücksichtigung der Stromproduktion durch das BHKW eingehalten werden.

Abgeschlossen wurde das Projekt **Sunny Woods** [41] in Zürich Höngg. Die 6 Wohneinheiten in einem Gebäude in Holzbauweise wurden als *Passivhaus* konzipiert. Die Erfolgskontrolle bestätigte den extrem tiefen Heizenergiebedarf von $5.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, welcher den Grenzwert von $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ massiv unterschreitet. Die gewichtete Energiekennzahl Wärme liegt bei $14.4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$.

Termingerecht bezogen wurde das **Passivhaus mit Atelier Nicole Schmölzer** in Pratteln [42]. In der Haustechnikzentrale kommen zwei Kombigeräte mit integrierter Kleinwärmepumpe für Lüftung, Heizung und Wärmerückgewinnung zum Einsatz. Die ersten Messungen haben gezeigt, dass die heute auf dem Markt erhältlichen Geräte für ein Passivhaus individuell eingestellt werden müssen. Nach diversen aufwändigen Optimierungsschritten funktioniert heute das System zufriedenstellend.



Figur 3: *Passivhaus Nicole Schmölzer:* Neuartige Schiebeläden mit integrierter Photovoltaik ergeben ansprechende Lichteffekte kombiniert mit hoher Funktionalität

Der **Kindergarten Paradisli** in Wil [43] konnte nach den Frühlingsferien 2003 bezogen und die Messungen konnten gestartet werden. Es zeigte sich sehr schnell, dass der grosszügig verglaste Kindergarten im Sommer nur mit einem optimalen Beschattungskonzept betrieben werden kann. Im Winter fehlen dagegen aufgrund der kurzen Belegungszeiten die internen Lasten. Bei schwacher Sonneneinstrahlung kann die Abluftwärmepumpe nicht genügend Wärme für den Heizbetrieb bereitstellen. Die Befürchtung der Programmleitung, dass ohne zusätzliche Wärmequelle wie Erdsonde oder Umgebungswärme nicht genügend Heizwärme zur Verfügung steht, bestätigte sich. Mit zusätzlichen Eingriffen in die Steuerung wird nun versucht, die Lüftung/Luftheizung bedarfsgerechter zu betreiben, das Erdregister optimal zu bewirtschaften um trotzdem ohne direkte elektrische Nachheizung auszukommen.

Das Projekt **Wattwerk – 1. Plusenergie-Gewerbehäus** [44] in Bubendorf BL wurde im Winter 2003/04 erstellt und wird anfangs Mai 2004 bezogen. Der zweigeschossige Holzbau mit angrenzender Lagerhalle hat den Luftdichtigkeitstest für die Zertifizierung nach *Passivhaus*-Standard erfolgreich absolviert. Die Bedingungen für die Erreichung des ambitionierten Standards konnten erfüllt werden. Mit Photovoltaik soll mehr Elektrizität produziert als verbraucht werden.

Einen besonderen Schwerpunkt bilden mustergültige Gebäudesanierungen. Da dazu vor allem die vorbildliche Umsetzung und weniger Forschung gefragt ist, wurde ein **Ideen-Wettbewerb für Minergie-P- resp. Passivhaus-Sanierungen** [45] ausgeschrieben. Die besten Projekte werden von einer Jury ausgezeichnet und sollen bis Ende 2005 bei der Realisierung unterstützt werden.

Dass Gebäudesanierungen mit *Minergie-P*-Standard durchaus möglich und sinnvoll sind, zeigen erste ausgeführte Beispiele. Der **Umbau Nietengasse** in Zürich [46a] wurde erfolgreich abgeschlossen. Ebenso wurde die **Sanierung Zwinglistrasse** [46b] durch das gleiche Planerteam termingerecht fertiggestellt. Bei beiden Projekten wird die Erfolgskontrolle Klarheit geben, ob die Gebäude aus dem 19. Jahrhundert den *Passivhaus*-Standard erreichen. Die konsequente Umsetzung der *Passivhaus*-Vorgaben, d. h. hoher Wärmedämm-Standard und gute Luftdichtheit, kombiniert mit einfacher, aber effizienter Haustechnik, ist bei beiden Projekten erfüllt, so dass die Ziele voraussichtlich erreicht werden.

SPEZIELLE HAUSTECHNIK

Das Forschungsprojekt **Neurobat**, welches die Entwicklung eines neuartigen Heizungsreglers auf der Basis von *Fuzzy Logic* und einem neuronalen Netzwerk zum Ziel hatte, wurde im Jahr 2000 abgeschlossen. Der Vorteil dieses Konzepts liegt darin, dass dieser Heizungsregler in der Lage ist, sich selbstlernend auf jedes Gebäude optimal einzustellen, was die Inbetriebnahme stark vereinfacht. Im Projekt **Demonbat** [47] wurde nun ein entsprechender Regler am CSEM-Gebäude in *Neuenburg* praktisch erprobt. Das Konzept hat sich im Vergleich zu einem konventionellen Regler gut bewährt, wenn auch die Energieeinsparungen mit 5 % bescheidener als erhofft ausgefallen sind. Es ist zu hoffen, dass nun die Hersteller von Heizungsreglern dieses fortschrittliche Konzept übernehmen.

Beim **Zweifamilienhaus «Im Tal» mit Duplex-WP für Heizung und Warmwasser** [48] in Barga wurde die Wärmeerzeugung detailliert ausgemessen. Dabei entzieht eine Wärmepumpe der Luft im Wasch-/Trocknungsraum die Energie, welche durch die erdberührten Bauteile aus dem Erdreich nachfließt. Das Duplex-Gerät erreicht die angestrebten Leistungszahlen bei weitem nicht. Der Hersteller ersetzte das Gerät anfangs 2004. Obwohl die Erfolgskontrolle abgeschlossen ist, kann mit den belassenen Messgeräten noch eine Nachkontrolle durchgeführt werden.

Das Projekt **Wellness Wärmerückgewinnung Brauchwarmwasser** in Adelsboden [49] zeigt auf, wie mit einfachen Mitteln Energie aus Bädern mit hohem Warmwasserverbrauch in einem Speicher zwischengelagert und nutzungsabhängig wieder für die Vorwärmung bereitgestellt werden kann. Die Wirksamkeit der Wärmerückgewinnung konnte mit den Messungen bestätigt werden. Es können knapp 30 % der benötigten Wärme zurückgewonnen werden. Mit den Messresultaten konnte gezeigt werden, dass durch die Wahl des Zeitpunktes der Rückspülungen und der Frischwassernachspeisung die Wärmerückgewinnung bis auf 35 % gesteigert werden kann.

Luftkollektorsysteme:

Bei allen drei Projekten mit Luftkollektoren wird auf eine Komfortlüftung verzichtet, welche bei *Minergie*, *Minergie-P* und dem *Passivhaus*-Standard zwingend vorgeschrieben ist. Die Ausführung von zwei Luftsystemen nebeneinander (Komfortlüftung und Kollektor/Hypokaustensystem) erweist sich aus Platzgründen als kaum realisierbar.

Das **Minergie-P-Gebäude mit Gratec-Isolation und Luftkollektorsystem** [50a] in Degersheim

konnte erfolgreich ausgeführt werden. Das Gebäude wurde bezogen und die ersten Erfahrungen bestätigen, dass der Komfort hoch ist. Eine thermische Belastung des Gebäudes durch den Luftkollektor konnte auch im heißen Sommer 2003 nicht festgestellt werden. Die Messungen werden 2004 abgeschlossen.

Das Projekt **Integration eines solaren Luftsystems und einer PV-Anlage** [50b] in Braunwald wurde 2001 mit dem schweizerischen Solarpreis ausgezeichnet. Dank der Lage auf knapp 1300 Metern profitieren das Kollektorsystem und die Photovoltaik-Anlage von einer guten winterlichen Sonneneinstrahlung. Mit einer Energiekennzahl Wärme von 19 kWh/(m²·a) unterschreitet das Objekt den *Minergie-P*-Standard um 36 %.

Nicht mit den gleichen Rekordwerten glänzen kann das Projekt **Integration einer konvektiven Fassade in ein Heimatschutzobjekt** [50c] in Herisau. Das Doppelfamilienhaus mit einer Kollektorfassade erreicht den *Minergie*-Standard von 42 kWh/(m²·a) nur im Hausteil West. Die Kollektorfassade erfüllt mit einem Deckungsgrad von rund 30 % die Erwartungen. Wie in Braunwald kommen auch hier Holzöfen für die Restwärmebereitstellung zum Einsatz.

Komfortlüftung

Beim Projekt **CO₂-basierte Lüftungssteuerung für ein Wohnhaus** in Wald [51] kommen neuentwickelte, kostengünstige CO₂-Sensoren zum Einsatz. Beim Wohnhaus – es unterschreitet den *Minergie*-Standard deutlich – steht die bedarfsgerechte Steuerung der Komfortlüftung im Vordergrund. Die Lüftungsstufen werden aufgrund der CO₂-Konzentration in den Räumen geregelt. Untersucht wird auch eine automatisierte Fensterlüftung.

Die Studie **Sanierung Wohnsiedlung Himmelrich** in Luzern [52] untersucht im Vorfeld einer grossen Sanierung die Möglichkeiten des Einbaus einer Komfortlüftung in die bestehenden Strukturen einer Wohnsiedlung. Das Planerteam erarbeitet zusammen mit Fachleuten der HTA Luzern bis April 2004 Varianten für die Etappe *Himmelrich 2* mit insgesamt 117 Wohnungen. Eine Entscheidungsmatrix der Lösungsmöglichkeiten soll auch auf andere Sanierungsprojekte übertragbar sein.

GEBÄUDEHÜLLE

Das Projekt **Deckenstrahlung in Eishallen und überdeckten Ausseneisfeldern** [53] umfasst drei Teile. Im ersten wird der Einfluss einer nachträglich installierten, IR-reflektierenden Deckenuntersicht auf den Wärme- und Kältebedarf der Hockeyhalle in Dübendorf messtechnisch untersucht. Im zweiten Teil werden die Emissionseigenschaften von geeigneten Materialien in Abhängigkeit der Alterung und Verschmutzung untersucht. 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. Das Ziel ist nun, den Einfluss der Überdachungsmaterialien auf den Kondensatausfall und den Kältebedarf zu ermitteln. Seit September 2003 werden dazu die Oberflächentemperaturen und die Oberflächenfeuchte der unterschiedlichen Überdachungsabschnitte gemessen.

SOLARIX-Wandheizsystem [54]: *Solarix* ist eine neu entwickelte Solarfassade mit transparenter Wärmedämmung TWD (ausssen) und vorgefertigten Betonelementen (innen). Das System wurde an der *Hausbau- und Minergie-Messe* vorgestellt. *Solarix* vereinigt ein Heiz- und Kühlsystem mit folgenden Komponenten: Wandflächen mit Absorbieren hinter den TWD-Fassaden, hydraulisches System zur Bodenheizung, Speicher resp. Erdregister, Steuerung der Kreise für den Heiz- und Kühlfall. Die Wärme aus den Fassaden wird entweder direkt in die Heizkreise (zusätzlich Bodenheizung) resp. im Kühlfall in die Erdregister geleitet. Ost-, Süd- und Westfassade eines Pilotprojekts sollen mit dem *Solarix*-System ausgelegt werden, die Nordfassade hat keine hydraulische Anbindung. Messungen an einer Modellwand wurden 2003 durchgeführt. Ab Frühjahr 2004 wird das Gebäude erstellt.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Die Anstrengungen im Sanierungsbereich konnten intensiviert werden. Damit wird einem wichtigen Anliegen der Energiepolitik entsprochen. Mittelfristig lässt sich nämlich der Energieverbrauch der Gebäude nur wirksam senken, wenn die bestehenden Gebäude entsprechend saniert werden.

Die Programmperiode 2000 bis 2003 ist weitgehend abgeschlossen. Mit der Zwischenausschreibung anfangs 2002 konnte das Programm in drei Bereichen auf aktuelle Bedürfnisse ausgerichtet werden:

- **Verstärkung der Anstrengungen im Sanierungsbereich.** Im Sommer 2003 wurde dazu ein Wettbewerb für Gebäudesanierungen, die nahe an den *Passivhaus*-Standard kommen, ausgeschrieben.
- **Ausdehnung der gesamtheitlichen Optimierung vom Einzelgebäude auf Quartiere.** Ende 2002 wurden in Zusammenarbeit mit dem ARE verschiedene Quartierentwicklungsprojekte gestartet und ein erstes Mal an der *Swissbau 2003* vorgestellt.
- **Bessere Integration des Warmwasserbereichs:** Die Erarbeitung einer Berechnungsmethode Warmwasser wurden in Angriff genommen. Sie soll es dem Planer ermöglichen, den

systembedingten Wärmeverlust von Warmwassersystemen zu berechnen und wo nötig Optimierungen vorzunehmen.

Bei den Demonstrationprojekten gilt nach wie vor *Minergie* (Neubauwert) für Neubauten und Sanierungen als Mindestanforderung und der *Minergie-P*- resp. der *Passivhaus*-Standard als Zielwert.

Eine umfassende Übersicht über die laufenden Forschungsarbeiten wird wiederum am **Status-Seminar der Energie- und Umweltforschung im Bauwesen** [59], welches am 9./10. September 2004 zum 13. Mal an der *ETH Zürich* durchgeführt wird, vermittelt werden. Das Seminar stellt auch wichtige Projekte aus dem **BFE-Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen EWG** vor. Dadurch können vermehrt auch die sozio-ökonomischen Aspekte der Energienutzung präsentiert werden. Hinweise zur Tagung sind zu finden unter www.empa-ren.ch/ren/Aktualitaet.htm.

Anfangs 2004 wird das Programm bis 2007 neu definiert. Die Schwerpunkte basieren auf dem **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 bis 2007** [58]. Im Sommer 2004 erfolgt eine entsprechende Projektausschreibung (deutsch/französisch). Informationen dazu sind ebenfalls unter www.empa-ren.ch/ren/Aktualitaet.htm verfügbar.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

Sämtliche Jahres- und Schlussberichte können unter www.empa-ren.ch heruntergeladen oder bei ENET bezogen werden.

- [1] R. Dones, (roberto.dones@psi.ch), PSI, Villigen: **Ecoinvent 2000 – Ökoinventare für Energiesysteme** (SB)
- [2] R. Frischknecht, (frischknecht@esu-services.ch), ESU, Uster: **Ökoinventare für Solar- und Heizsysteme** (SB)
- [3] W. Hässig, (werner.haessig@bhz.ch), Basler + Hofmann, Zürich: **Ökologische Aspekte von Komfortlüftungen** (JB)
- [4] M. Vogel, (Martin.Vogel@bve.be.ch), Hochbauamt Kt. Bern, Bern: **eco-devis: Ökologische Leistungsbeschreibungen** (SB)
- [5] M. di Paolantonio, (m.dipaolantonio@holligerconsult.ch), Holliger Consult GmbH, Epsach: **Konzept elektronischer Bauteilkatalog** (SB)
- [6] A. Lalive, (alalive@bhz.ch), Basler&Hofmann, Zürich: **Ökologische Optimierung von Solargebäuden über deren Lebenszyklus** (Beitrag IEA/SHC Task 28) (JB)
- [7] R. Stulz, (roland.stulz@novatlantis.ch), novatlantis, Zürich: **Projektkoordination Nachhaltige Quartierentwicklung** (JB)
- [8] A. Binz, (a.binz@fhbb.ch), FHBB, Muttenz: **a) Nachhaltige Quartierentwicklung Basel Gundeldinger Feld** (ZB) • **b) Vakuum-Dämmung im Baubereich – Systeme und Applikationen** (Beitrag IEA BCS Annex 39) (JB)
- [9] J.-B. Gay, (gay@lesopc67.epfl.ch), EPF LESO-PB, Lausanne: **Nachhaltige Quartierentwicklung Lausanne Bellevaux** (ZB)
- [10] J. Inderbitzin, (buero.bitzi@bluewin.ch), HSW, Luzern: **Nachhaltige Quartierentwicklung Luzern Basel-Bernstrasse** (ZB)
- [11] W. Ott, (walter.ott@econcept.ch), Econcept, Zürich: **Nachhaltige Quartierentwicklung Zürich Werdwies** (ZB)
- [12] R. Hastings, (robert.hastings@freesurf.ch), AEU, Wallisellen: **a) IEA/SHC Task 28: Sustainable Solar Buildings (Nachhaltige Solar-Wohnbauten)** (JB) • **b) Beispiele nachhaltiger Wohnbauten: Umsetzung internationaler Erfahrungen** (SB)
- [13] T. Andris, (tom.andris@renggli-haus.ch), Renggli AG, Schötz: **Marktanalyse Passivhaus Schweiz** (Beitrag IEA/SHC Task 28) (JB)
- [14] Y. Kaiser, (sonnenarchitektur@energienetz.ch), Kaiser & Partner, Winterthur: **Solargebäude – Strategien und Erfahrungen des energieoptimierten Bauens** (SB)
- [15] B. Frei, (bhfrei@hta.fhz.ch), Luzern/Horw: **Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser** (JB)
- [16] Ch. Filleux, (chfilleux@BHZ.ch), Basler + Hofmann, Zürich: **Planungsrichtlinie für solare Luftheizsysteme** (SB)
- [17] S. Kropf, (kropf@hbt.arch.ethz.ch), ETH, Zürich: **Integration von kombinierten PV- und thermischen Kollektoren in Gebäudesystemen** (SB)
- [18] 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** (JB) • **b) Daylighting Buildings in the 21st Century** (Beitrag IEA Solar Task 31) (JB)
- [19] M. Bonvin, (michel.bonvin@hevs.ch), Haute école valaisanne, Sion: **bSol - Logiciel daide à la décision en matière dénergétique du bâtiment** (SB)
- [20] B. Keller, (bkeller@hbt.arch.ethz.ch), Professur für Bauphysik, ETH, Zürich: **Weiterentwicklung der Klimaflächenmethode und -software zu erhöhter Praxisverwendbarkeit** (JB)
- [21] Th. Frank, (thomas.frank@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Überarbeitung Programm HELIOS-HELIOS-Hygro**

- [22] A. Baumgartner, (andreas.baumgartner@amstein-walthert.ch), Amstein+Walthert AG, Zürich: **Definition von Zusatzanforderungen zu den MINERGIE®-Standards** (SB)
- [23] H. Huber, (hjhuber@hta.fhz.ch), HTA, Luzern/Horw: **Einfache Lüftungsanlagen - Entwicklung von Berechnungstool für einfache Lüftungsanlagen** (SB)
- [24] L. Nissile, (lukas.nissille@minergie.ch), MINERGIE Agentur Bau, Bern: **Entwicklung von Standardlösungen für den MINERGIE®-Standard** (SB)
- [25] 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** (JB)
- [26] H. Simmler, (hans.simmler@empa.ch), EMPA-Dübendorf: **a) Vakuum-Dämmsysteme im Baubereich – Qualitätssicherung und bauphysikalische Grundlagen** (Beitrag IEA BCS Annex 39) (JB) • **b) Messung und Simulation von transparenten Bauteilen mit Sonnenschutz** (Beitrag IEA Solar Task 27) (JB)
- [27] Ch. Tanner, (christoph.tanner@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Messung und Beurteilung der Luftdichtigkeit von Niedrigenergiehäusern** (JB)
- [28] Hp. Eicher, (hanspeter.eicher@eicher-pauli.ch), Eicher+Pauli AG, Liestal: **Bestellerkompetenz im Bereich Gebäudetechnik** (JB)
- [29] J.-M. Chuard, (chuard@enerconom.ch), Enerconom, Bern: **Commissioning of Building HVAC Systems for Improved Energy Performance (IEA BCS Annex 40)** (JB)
- [30] R. Furter, (rforter@hta.fhz.ch), HTA, Luzern/Horw: **Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte für Komfortlüftung** (JB)
- [31] V. Dorer, (viktor.dorer@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Optimierte Luftheizsysteme für Passivhäuser** (SB)
- [32] E. Füglistner, (erich.fueglistner@amstein-walthert.ch), Amstein+Walthert AG, Zürich: **Methode zur Berechnung des Jahresenergieverbrauchs von Warmwasseranlagen** (JB)

Liste der P+D-Projekte

- [33] Peter Schibli, (synergiepark@bluewin.ch) Heizplan AG, Gams, **Datenerfassung Synergiepark für erneuerbare Energien** (JB)
- [34] Th. Nordmann, (nordmann@tnc.ch), Erlenbach: **Messprojekt Niedrigenergiehaus Erlenbach** (SB)
- [35] M. Renggli, (max.renggli@renggli-haus.ch), Renggli AG, Sursee, **Wohn- und Geschäftshaus Renggli, Sursee** (SB)
- [36] U.-P. Menti, (urs-peter.menti@amstein-walthert.ch), Amstein+Walthert AG, Zürich: **Vorbklärungen Pilotprojekt Sunfactory Tramelan** (JB)
- [37] D. Pahud, (daniel.pahud@dct.supsi.ch), LEEE-SUPSI, Trevano: **Low Energy Housing in Ticino** (Beitrag IEA SHC Task 28) (SB)
- [38] W. Setz, (setzw@bluewin.ch), Architekt, Rapperswil: **1. Schweizerischer Wohn- und Gewerbebau im Passivhaus-Standard**, (SB)
- [39] B. Bossard, (barbos@tic.ch), Barbos Bauteam, Stans: **Passiv-Acht-Familienhaus** (SB)
- [40] Ch. Breu, (breu_christoph@bluewin.ch), Architekt und Ingenieur, Rickenbach: **Passiv-Mehrfamilienhaus Stämpfli Unterägeri**, (SB)
- [41] R. Naef, (naef@igjzh.com), Naef Energietechnik, Zürich: **Wohnen in Sunny Woods** (SB)
- [42] Reto Miloni, (miloni@swissonline.ch) Lichtplanung Miloni, Mülligen, **Passivhaus mit Atelier, Pratteln** (JB)
- [43] D. Grob, (grob-schoepfer@tbwil.ch) Grob Grob und Schöpfer AG, Wil: **Kindergarten Paradisli**, (JB)
- [44] H. Holinger, (heinrich@holinger-solar.ch), Holinger Solar AG, Liestal: **Wattwerk- erstes Plusenergie-Gewerbehaus** (JB)

- [45] H. Weber, (heinz.weber@ibe.ch), ibe, Bern: **Durchführung Ideen-Wettbewerb für Passivhaus-Sanierungen**
- [46] K. Viridén, (viriden@viriden-partner.ch), Viridén+Partner, Zürich: **a) Umbau Nietengasse 20 – mit bestehender Backsteinfassade** (JB) • **b) Passivhaus-Umbau Zwinglistrasse** (JB)
- [47] J. Krauss, (jens.krauss@csem.ch), CSEM, Neuchâtel: **Pilotprojekt Demonbat** (SB)
- [48] M. Stüssi, (mstuessi@dplanet.ch) Barga: **Neubau Zweifamilienhaus Im Tal 8233 Barga SH, Heizung - Warmwasser - Wäschetrocknung mit einer Duplex-Wärmepumpe** (SB)
- [49] P. Stähli, (Peter.Staehli@swisseconomic.ch), IEM AG, Gwatt-Thun: **Wellness Wärmerückgewinnungsanlage Brauchwarmwasser**, (SB)
- [50] A. Gütermann, (amena.ag@energienetz.ch), amena ag, Winterthur: **a) Minergie-P-Gebäude mit Gratec und Luftkollektorsystem** (JB) • **b) Integration eines solaren Luftsystems und PV bei einer Gebäudesanierung**, (SB) • **c) Integration einer konvektiven Fassade in ein Heimatschutzobjekt**, (SB)
- [51] W. Hässig, (whaessig@BHZ.ch), B+H, Zürich: **CO₂-basierte Lüftungssteuerung für ein Wohnhaus** (JB)
- [52] B. Züsli, (beat.zuesli@bluewin.ch), Architekt, Luzern: **Sanierung Wohnsiedlung Himmelrich in Luzern: Varianten Wohnungslüftung**
- [53] F. Gachnang, (gachnang@eta-energietechnik.ch), eta Energietechnik, Winterthur: **Deckenstrahlung in Eishallen und überdeckten Ausseneisfeldern** (JB)
- [54] P. Oesch, (p.oesch@twdmueller.ch), Gebr. Mueller AG, Bern: **P+D-Projekt mit Messungen SOLARIX- Wandheizsystem Solarix** (JB)

Referenzen

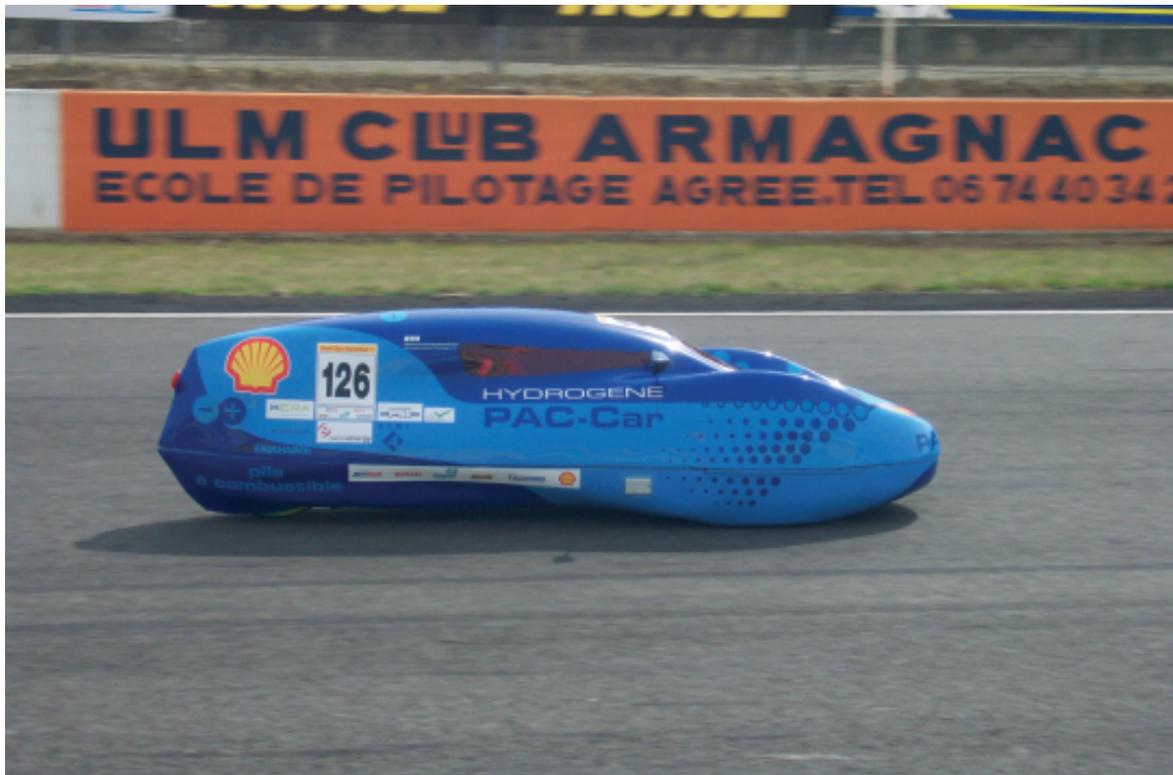
- [55] H.L. Gorhan, M. Zimmermann et al: **SIA Dokumentation D 0179: Energie aus dem Untergrund – Erdreichspeicher für moderne Gebäudetechnik**, SIA Zürich, August 2003
- [56] M. Zimmermann et al: **Handbuch der passiven Kühlung**, Fraunhofer IRB-Verlag, 2003, ISBN 3-8167-6267-0
- [57] M. Zimmermann: **Erneuerbare Energien in der 2000-Watt-Gesellschaft**, Schweizer Energiefachbuch 2003
- [58] Eidg. Energieforschungskommission CORE: **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 bis 2007**, 1. Januar 2004, download: www.energie-schweiz.ch/internet/03095/index.html?lang=de
- [59] **13. Status-Seminar der Energie- und Umweltforschung im Bauwesen**, 9./10. September 2004, ETH Zürich (www.empa-ren.ch → Aktuelles)

VERKEHR / AKKUMULATOREN

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Martin Pulfer

martin.pulfer@bfe.admin.ch



Pac-Car der ETH Zürich am Eco-Marathon

Der Pac-Car benötigt auf 90 km 15 g Wasserstoff, was auf 1700 km 1 Liter Benzinäquivalent entspricht. Wenn dieses Fahrzeug 17 Mal weniger effizient, dafür komfortabler, praktikabler und sicherer gebaut wird, gelangt man zum CO₂-freien 1 Liter-Auto. Auch die nachhaltige Wasserstoffherstellung und Verteilung bedarf noch weiterer Forschung.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

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

In Figur 1 sind die prozentualen Anteile der einzelnen Etappenlängen von PW-Fahrten und zusätzlich die Verbrauchs- und Emissionsentwicklung bezogen auf den Fahrkilometer aufgezeichnet. Es wird ersichtlich, dass rund 50% der Fahrten kürzer als 5 km sind. Der Verbrauch und die Emissionen beim Kaltstart entsprechen je 100 %. Durch die Reduktion der innermotorischen Widerstände beim aufgeheizten Antrieb verbessert sich Energieeffizienz des Systems gegenüber dem Kaltstart um ca. 20 %. Bezüglich der Schadstoffemissionen ist der Unterschied zwischen dem Kaltstart und dem aufgeheizten Antriebssystem inklusive Katalysator wesentlich dramatischer: Die Verbrennung verläuft bei hoher Temperatur wesentlich sauberer und der Katalysator entfaltet seine volle Wirkung erst bei seiner optimalen Betriebstemperatur.

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.

Auch bei PW-Fahrten mit dem Fahrstil *Eco-Drive* kann 10 –15 % Treibstoff eingespart werden. Hierbei sind auch der Pneudruck, Luftwiderstand und Ballast gebührend zu berücksichtigen. Durch den Kauf eines effizienten Personenwagens lassen sich, gegenüber einem ineffizienten, bei gleicher Sitzplatzzahl, gleichem Nutzvolumen und Komfort, gut 30 % Treibstoff sparen.

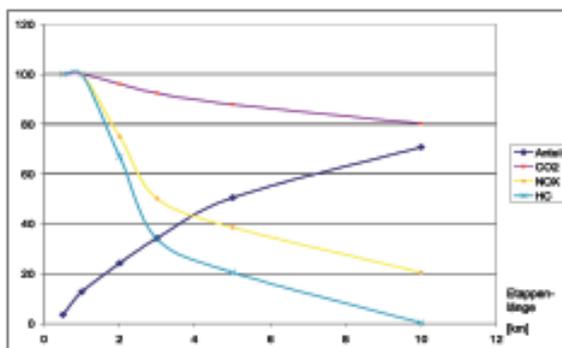
Das **Forschungsprogramm Verkehr** untersucht Ansätze und Massnahmen zur Absenkung des Energieverbrauchs im Verkehr, insbesondere beim Hauptverbraucher, dem motorisierten Individualverkehr. Erreicht werden damit auch eine Reduktion der Umweltbelastung sowie die Stärkung des Industriestandorts Schweiz.

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

- Leichtere und / oder kleinere Fahrzeuge,
- Effizientere Antriebsstränge,
- Angepasstes Mobilitätsverhalten.

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

- *Zebra*batterie: 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



Figur 1: Einfluss der Etappenlänge eines PW auf den km-bezogenen Treibstoffverbrauch (CO₂) und die Schadstoffemissionen (NOx und HC) und Anteil der entsprechenden Streckenlängen an allen PW-Fahrten in Prozent (Datenquelle ARE und EMPA, Idee BFE).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

VERKEHR

Grundlagen

Im Auftrag des BFE untersucht die ETH Zürich die Wirkung der **Eco-Drive Fahrweise von Fahrzeugen ab dem Modelljahr 2010** [1]. *Eco-Drive* stellt eine Möglichkeit dar, den Kraftstoffverbrauch im realen Betrieb von Fahrzeugen zu reduzieren. Die Massnahmen für diese Treibstoffeinsparungen gliedern sich in zwei Teile: das effektive Fahrverhalten und sonstige Massnahmen wie die Kontrolle des Reifendrucks oder die Entfernung von unnötigen Lasten. Mit Simulationen wird primär das Schaltverhalten und in untergeordnetem Masse die vorausschauende Fahrweise berücksichtigt. Die Idee der *Eco-Drive*-Fahrweise ist, durch ein angepasstes Fahrverhalten den Verbrennungsmotor in günstigen Betriebspunkten zu betreiben, was zu Treibstoffeinsparungen führt. Die günstigen Betriebspunkte lassen sich durch ein angepasstes Schaltverhalten erreichen. Ein Normalschaltverhalten und ein *Eco-Drive*-Schaltverhalten wurde von EMPA-Experten in ein Simulations-Modell integriert. Anfangs 2002 erarbeitete die EMPA Dübendorf eine Studie zu *Eco-Drive*, welche das Modell mit Messwerten von Ottomotoren quantitativ untermauerte. Der erste Teil der Studie befasst sich mit der quasistatischen Simulation eines heutigen Ottomotors und eines Dieselmotors, um das EMPA-Modell mit den Herstellerdaten vergleichen zu können. Ottomotoren und Dieselmotoren sind heute überproportional vertreten. Eine gute Übereinstimmung von Messung und Simulation konnte erreicht werden. Die Messungen der EMPA ergaben ein Einsparpotential beim Ottomotor von 17.6% und das Modell berechnete 21%. Beim Dieselfahrzeug vermindert sich der Verbrauch durch *Eco-Drive* um etwa 6%, also weniger stark als beim Ottomotor. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass ein Dieselmotor nicht gedrosselt wird. Der folgende Teil der Studie untersuchte Fahrzeuge für das Jahr 2010.. Mit einer Literatur- und einer Internetrecherche wurden für das Jahr 2010 als Antriebskonzepte ein Benzinmotor mit vollvariabler Ventilsteuerung (VVT) (Verbrauchseinsparung durch *Eco-Drive* von 1.4% bis 3.5%), ein aufgeladener hubraumverkleinerter Benzinmotor mit VVT (bis 3.1%), ein milder Hybrid (12.5% bis 18%) und ein Sechsganggetriebe (bis 11.4%) analysiert. Beim Dieselmotor wird sich in punkto Teillastwirkungsgrad in Zukunft nicht viel verändern, denn die Entwicklungen zielen auf eine Verbesserung der

Emissionswerte ab, deren Systeme zusätzlichen Treibstoff benötigen. Der zukünftige Benzinmotor wird einen besseren Teillastwirkungsgrad aufweisen, weshalb das *Eco-Drive*-Schaltverhalten einen kleineren Einfluss auf den Verbrauch haben wird. Durch die zunehmende Verbreitung von (verbesserten) Automatikgetrieben wird der Einfluss vom *Eco-Drive*-Schaltverhalten abnehmen, da die Gangwahl nicht mehr direkt beeinflusst werden kann. Auch milde Hybride werden mit einem Automatikgetriebe ausgestattet sein. Um einen besseren Motorenwirkungsgrad zu erzielen müssen die Getriebehersteller ihre Schaltlogik entsprechend anpassen. Die anderen *Eco-Drive*-Massnahmen wie Kontrolle des Reifendrucks, vorausschauende Fahrweise, Aerodynamik und das Entfernen von unnötigen Lasten bergen immer noch grosse Potentiale zur Treibstoffeinsparung.

Im Sommer 2002 startete das Amt für Umwelt und Energie Basel-Stadt zusammen mit den Verkehrsverbänden ACS, TCS und VCS die Aktion **Reifen pumpen - Treibstoff sparen - sicher fahren** [11]. Dieses Pilotprojekt gehört ebenfalls zur Thematik *Eco-Drive* und dessen Evaluation wurde vom BFE unterstützt. Während drei Wochen wurde an 14 Tankstellen allen Autofahrerinnen und Autofahrern aus der Region Basel ein gratis Pumpservice angeboten. Die breit angelegte Sommeraktion war so beliebt, dass im Herbst 2002 eine Nachfolgeaktion durchgeführt wurde. Die angebotene Dienstleistung wurde rege benutzt. Rund 17'500 Personen wurden über den optimalen Reifendruck informiert. Die Hälfte von ihnen liess gleich an Ort und Stelle eine Druckkontrolle durchführen. Dabei zeigte sich Erstaunliches: 67 Prozent der kontrollierten Autos waren im Schnitt mit 0.25 bar Unterdruck unterwegs! Die hohe Zahl von 67 Prozent bestätigte, dass die Aktion am richtigen Ort ansetzt. Ohne teure technische Anschaffungen und ohne Verzicht erzielte die Dienstleistung eine grosse Wirkung: Mit der Aktion konnten rund 203'000 Liter Benzin eingespart werden. Dies entspricht dem Jahresverbrauch von 135 Autos und bedeutet jährlich 485 Tonnen weniger CO₂. Die hohe Zahl von 67 Prozent zeigt zudem, dass ein beachtliches Einsparpotential auch für die gesamte Schweiz vorliegt. Würde in der Schweiz eine regelmässige Druckkontrolle als obligatorisch erklärt, könnten jährlich rund 90 Mio. Liter Treibstoff eingespart werden. Für die Umwelt würde dies eine jährliche Reduktion von 215'000 Tonnen CO₂ bedeuten. Ein beachtlicher Beitrag und einfacher Schritt in

Richtung der Zielvorgabe des Kyoto-Protokolls. Die Aktion genoss landesweit grosses Interesse und hat den TCS-Umweltpreis gewonnen.

Im Kanton Glarus sind seit April 2002 zwei Erdgasbusse des Herstellers *VanHool* im Einsatz (Fig. 2). Im Auftrag des BFE wurde ein Erfahrungsbericht des Einsatzes dieser **Erdgasbusse** [1] erarbeitet. Dieser Bericht legt einerseits die gemachten Erfahrungen des Betreibers *Autobetriebe E. Niederer* dar und andererseits wurden drei verschiedene Busfahrzeuge mit anderen Busantriebssystemen hinsichtlich Energieverbrauch, Leistung, Lärm- und Schadstoffemissionen verglichen: Ein *NAW*-Bus mit *Mercedes*-Dieselmotor, ein *Mercedes Citaro*-Bus mit *Mercedes*-Dieselmotor und integriertem Russfiltersystem *CRT* und ein *VanHool*-Bus mit *MAN*-Erdgasmotor und Oxidationskatalysator bilden die Basis für diese Analyse. Die Erfahrungen des Betreibers und der Fahrgäste wurden mittels Befragungen ermittelt. Betreiberseitig wurden sowohl der Unternehmer als auch der Mechaniker und die Chauffeure befragt. Die Erfahrungen dieser Befragten waren unterschiedlich. Einhellig waren sie jedoch der Meinung, dass die aufgetretenen Probleme bei der Einführung der Erdgasbusse auf die noch nicht ausgereifte elektronische Steuerung zurückzuführen sind. Fahrtechnisch mussten sich die Chauffeure an das Beschleunigungsverhalten der Erdgasbusse anpassen. Beim Anfahren reagierte der Erdgasbus im Vergleich zu den Dieselbussen viel spritziger. Bei höheren Drehzahlen glied sich das wieder aus. Das Hauptmerkmal des Erdgasbusses ist für die Chauffeure die angenehme Fahrlage des Fahrzeuges. Neben diesen Erfahrungen der Betreiber interessierte aber insbesondere auch die Kundenakzeptanz. Die Kunden sind zwar offen für ökologische Fahrzeuge und würden mehrheitlich dafür auch mehr zahlen, doch der Fahrkomfort und die Sitzplatzgestaltung stehen bei ihnen im Vordergrund. Um den Energieverbrauch der drei Fahrzeuge zu vergleichen, wurden die Fahrtenschreiberkarten ausgewertet. Damit konnte das Streckenprofil in Bezug auf die Beschleunigungen und Leerlaufzeiten der Busse charakterisiert werden. So konnte abgeschätzt werden, wie hoch der Verbrauch des *Mercedes Citaro* und des *NAW* auf der Fahrroute des Erdgasbusses wäre. Die Gegenüberstellung zeigt, dass der Erdgasbus zwar ca. 10% mehr Energie verbraucht, jedoch ca. 5-10% weniger CO₂ produziert als der *NAW*-Bus und der *Mercedes Citaro*. Um die Lärmemissionen der Fahrzeuge vergleichen zu können wurden Lärmmessungen durchgeführt. Ausserhalb des Fahrzeuges liegt der Erdgasbus mit einer Ausnahme zwischen 2.4 und 11.2 dB tiefer und innerhalb mit einer Ausnahme um 0.5 bis 5.1 dB höher als die Vergleichsfahrzeu-

ge. Bei der Beurteilung der Messresultate im Inneren des Fahrzeuges muss berücksichtigt werden, dass verschiedene Masse (Länge, Höhe, Motorlage) der Busse die Messungen beeinflussen können. Die Studien, welche die Schadstoffemissionen von Gas- und Dieselbussen gemessen haben, zeigen, dass die NO_x- und Partikelemissionen beim Gasbus deutlich tiefer liegen als beim Dieselbus. Bei der CO₂-Produktion der Fahrzeuge teilen sich die Resultate. Bei einer Studie produziert der Dieselbus ca. 6% mehr CO₂ als der Gasbus und bei zwei anderen Untersuchungen produziert der Gasbus 2% respektive 9.5% mehr CO₂ als der Dieselbus. Diese Werte hängen stark von der jeweils verwendeten Motorsteuerung ab.



Figur 2: Erdgasbus im Linienbetrieb im Kanton Glarus

Das Forschungsprojekt **Finanzielle Anreize für energieeffiziente Fahrzeuge** [2] der *ARGE Rapp Trans* in Zürich und *Interface* in Luzern untersucht anhand der Projekte *VELdue* und *New Ride* mögliche Ansätze für einen besseren Absatz solcher sparsamer Fahrzeuge. Das Projekt wird vom *ASTRA*, *BUWAL* und *BFE* unterstützt. Die Resultate der Forschungsarbeit werden auf ca. Mitte 2004 erwartet.

Leichtbau und kleine Fahrzeuge

Die Firma *Horlacher AG* schloss das Projekt *Modultec II* im Jahr 2002 erfolgreich ab. Auf Basis dieser Resultate und in Zusammenarbeit mit bedeutenden nationalen Firmen und Institutionen (*Rieter Automotive AG*, *Symalith AG*, *Vesto AG*, *Kaufmann AG*, *Winterthur Versicherung*, den Fachhochschulen beider Basel und der Fachhochschule Brugg / Windisch) konnte im Berichtsjahr das Projekt **LIVIO 21** [3] gestartet werden. Bei diesem Projekt werden der Leichtbau der Fahrzeuge verbessert und gleichzeitig die Folgen eines Unfalls für die Fussgänger reduziert. Erste Zwischenergebnisse können Ende 2004 erwartet werden.

Das Projekt **Ultraleicht scooter** [4] der Fachhochschulen Bern, Biel und Burgdorf klärt die Machbarkeit eines ultraleichten, sehr energieeff-

fizienten Scooters (ULS) ab. Die Untersuchungen beinhalten sowohl die technischen als auch ökonomischen Aspekte und schliessen das Product-Placement und die Fragen der Fahrzeugzulassung mit ein. Zur industriellen Umsetzung werden Gespräche mit potentiellen Industriepartnern geführt. Ausgangsbasis für das Projekt ist das *Intelbike* (vergleiche Jahresberichte 2001 und 2002). Das Projekt soll 2004 abgeschlossen werden.

Das Projekt **Pac-Car** [1] der ETH Zürich demonstrierte am Shell Eco-Marathon in Frankreich das Sparpotential der Brennstoffzelle in der Mobilität (s. Titelbild Programmbericht). Das mit geringem Kostenaufwand erbaute System, bestehend aus Chassis, Wasserstoffspeicher, Brennstoffzelle, Nebenaggregate, Leistungselektronik und Elektomotor erreichte auf Anhieb einen sehr tiefen Verbrauch von 15 g Wasserstoff pro 90 km entsprechend einem Benzinäquivalent von 1 Liter pro 1694 km. Dennoch ist das System noch nicht ausgereizt und wesentliche Verbrauchseinsparungen werden mit dem vom BFE unterstützten Folgeprojekt *Pac-Car II* für das Jahr 2005 angestrebt.

Die Firma *Hess Carrosserie AG* entwickelt mit Unterstützung des BFE den **Swisstrolley III** [5]. Dieser Linienbus wird verlängert und insbesondere leichter gebaut. Hierdurch kann einerseits Energie gespart und andererseits können mehr Fahrgäste transportiert werden. Diese Design-Studie wird ca. Ende 2004 abgeschlossen.

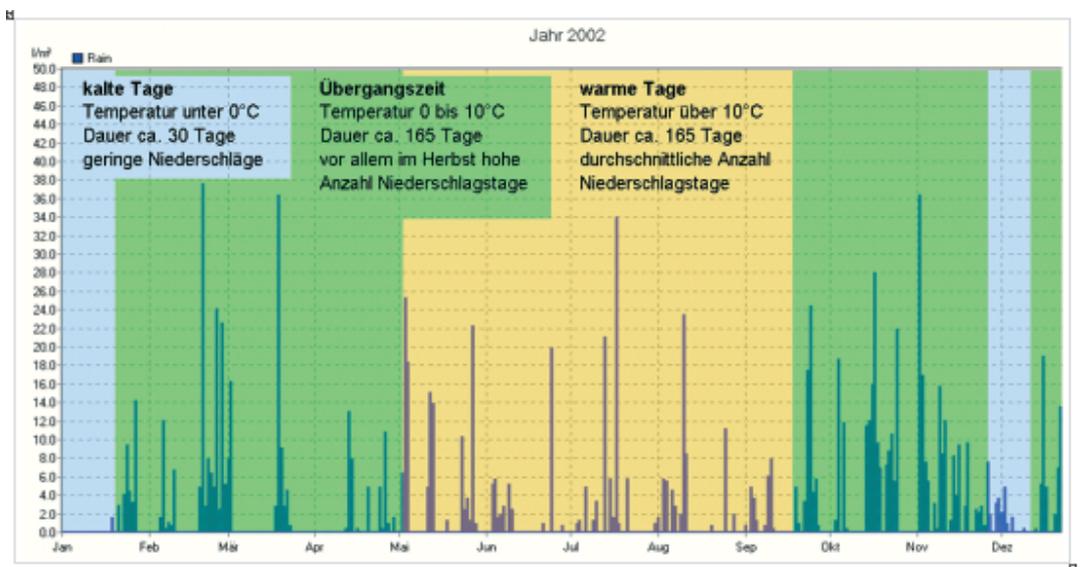
Im Auftrag des BFE entwickelt die Firma *Tribecraft* einen **Wetterschutz** [6] für Fahrräder. Ziel dieser Entwicklung ist ein praktikabler, eleganter und leicht mitzunehmender Schutz, der die Allwettertauglichkeit des Fahrrades wesentlich erhöhen,

aber nicht vor Extremereignissen schützen soll, damit die Konstruktion nicht zu aufwändig wird. Wie Figur 3 zeigt, sind in der Schweiz Extremereignisse ohnehin relativ selten. Hiermit soll die Akzeptanz und Verbreitung des Fahrrades als energieeffizientes Nahverkehrsmittel weiter gefördert werden. Erste Prototypen werden ca. Mitte 2004 vorliegen.

Antriebssysteme

Das Projekt **Palos II** [1] der ETH Zürich befasst sich mit der Erhöhung des Teillastwirkungsgrades von Antriebssystemen. Das Projekt ist in die zwei Teile Aufladung und optimierte Nebenaggregatstrategien gegliedert:

Die Aufladung des Verbrennungsmotors ermöglicht es, einen hubraumreduzierten Motor zu verwenden. Dies ergibt bessere Wirkungsgrade in der Teillast, jedoch eine schlechtere Dynamik (Fahrbarkeit) des Fahrzeuges. Für die Aufladung kommen unterschiedliche Aggregate in Frage. Im Projekt werden der Abgasturbolader und schwergewichtig der Druckwellenlader untersucht. Gegenüber dem Abgasturbolader verspricht der Druckwellenlader eine deutlich verbesserte Dynamik, jedoch ist er steuerungs/regelungstechnisch schwieriger zu beherrschen, da Frischluft und Abgas in direktem Kontakt miteinander sind. Eine ungewollte Abgasrückführung gilt es mit geeigneten Regelstrategien zu unterbinden. Diesbezügliche Erfahrungen und Lösungsansätze aus früheren Projekten sollen auf das neue System angewendet werden. Der Umbau des Versuchsmotors von Turbolader auf Druckwellenlader sowie die Inbetriebnahme des Systems ist nun



Figur 3: Niederschlagsprofil der Schweiz: Extreme Niederschläge sind selten – mit einem leichten Wetterschutz kann eine sehr hohe Abdeckung erzielt werden.

vollzogen worden. Wie erwartet zeigt das System für tiefe Massendurchsätze (Motordrehzahlen) schon hohe Aufladegrade sowie einen schnelleren Druckanstieg. Beides wird die Fahrbarkeit des Motors positiv beeinflussen, da das Drehmoment bei tiefer Teillast nach einem Fahrpedalsprung einerseits schneller und andererseits auf einen höheren Wert ansteigt als dies beim Turboladersystem der Fall ist.

In den letzten Jahren hat der Energieverbrauch der Nebenaggregate kontinuierlich zugenommen. Insbesondere im Teillastbereich macht der durch die Nebenaggregate verursachte Energiebedarf einen signifikanten Anteil am gesamten Kraftstoffverbrauch aus. Dem optimierten Betrieb der Nebenaggregate kommt somit eine grosse Bedeutung zu. Er senkt den Verbrauch und die Emissionen und verbessert die Fahrsicherheit und den Insassenkomfort. Typische Nebenaggregate sind die in modernen Fahrzeugen vermehrt eingebauten Zuheizer (brennstoffbetriebene und mechanisch betriebene Zuheizer). Die Zuheizer werden während der Warmlaufphase des Fahrzeugs zur Erhöhung des Insassenkomforts (Heizwärme) und der Sicherheit (Enteisung der Scheiben) verwendet. Ein optimal betriebener Zuheizer erfüllt diese Anforderungen unter Minimierung des Energieaufwands. Inhalt der Untersuchungen war die Entwicklung einer Regelung für einen Brennstoffzuheizer, mit dem Ziel, den Insassenkomfort bei möglichst geringem Kraftstoffverbrauch zu maximieren. Für die Herleitung des optimalen Regelgesetzes musste zuerst ein mathematisches Modell des Gesamtsystems aufgebaut werden. Das Modell umfasst den Motor, den Zuheizer und

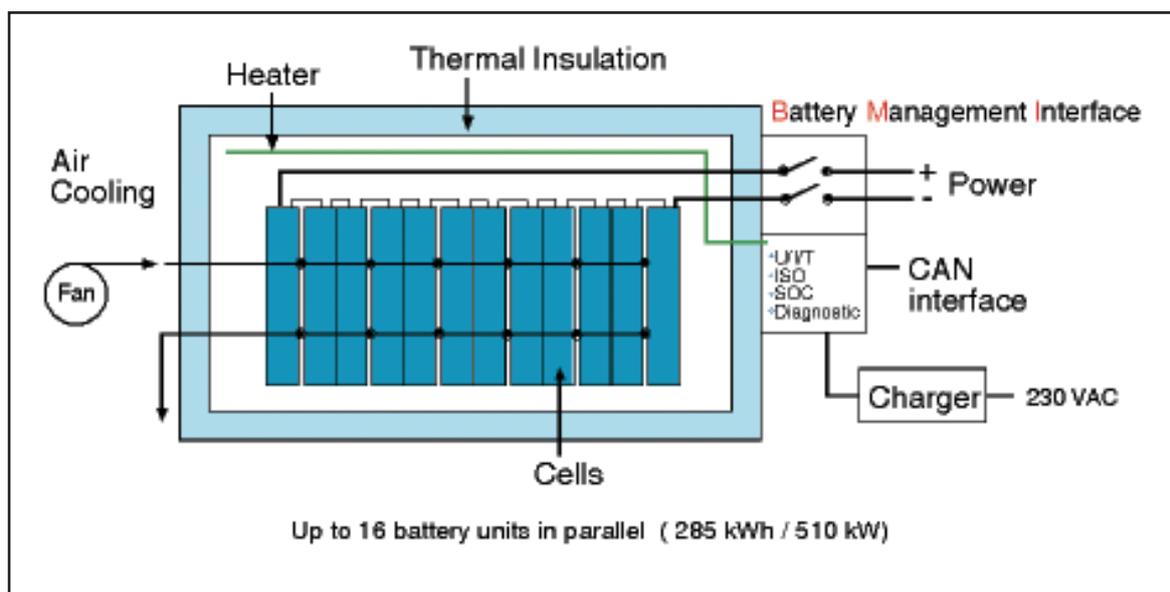
den Fahrzeuginnenraum. Anhand von Messdaten wurde das Modell auf die Realität abgestimmt. Basierend auf diesem Modell wurde dann ein *Optimal-Control-Problem* formuliert und gelöst. Das für die Optimierung definierte Gütekriterium bewertet den Einfluss des Zuheizers sowohl auf den Komfort als auch auf den Kraftstoffverbrauch. Im Hinblick auf einen Einsatz im Fahrzeug musste das Regelgesetz noch um einige Komponenten erweitert werden. Die Funktion des optimalen Regelgesetzes wurde schliesslich in simulierten Fahrzyklen überprüft und analysiert.

Das Ziel des Projekts **Brennstoffzellen-SAM** [7] der Fachhochschulen Bern und Biel besteht im Bau einer 6-kW-PEM-Brennstoffzelle und der nachfolgenden Integration in das Elektrofahrzeug SAM der Firma CREE. Als wichtiger Bestandteil diente die kombinierte Membran- Elektroden-Einheit der Firma Umicore, welche die Leistungsdichte der Zellen um mindestens 50% erhöhte. Das Brennstoffzellendesign basiert auf der Power-Pac-Technologie der ETH Zürich und wurde für die 6-kW-Brennstoffzelle um 25% grösser gestaltet.

Die Kenndaten des Stacks lauten:

Volumen:	450 mm x 210 mm x 155 mm
Masse:	19.2 kg
EI.Leistung:	6.1 kW bei 61 V und 100 A
Stromdichte:	510 mA / cm ²

In der Folge werden Brennstoffzellenstack, Nebenaggregate, Wasserstofftank und Elektromotor in das Fahrzeug SAM integriert, optimal aufeinander abgestimmt und getestet.



Figur 4: Prinzipieller Aufbau der Zebrabatterie

Das im Projekt **Energiemanagementsystem** [4] der Fachhochschule Bern und der *Autork AG* erlaubt eine dezentrale Steuerung und Vernetzung aller Energie liefernden, wandelnden und speichernden Elemente in einem mobilen oder stationären System (bsp. Kleinfahrzeug mit Elektrotraktion oder Inselanlage). Ziel des Projekts ist der Bau eines dezentralen Steuerungs- und Energie-Management-Systems für die Anwendung in Muskelkraft-Elektrohybriden (z.B. Elektro-Velo). Voraussichtlich werden dazu die Konzepte des Intellibike-Batteriemagements in die Entwicklung eines ultraleichten Scooters einfließen. Bis Ende

2003 konnte bereits das kettenlose Serie-Hybrid-Elektro-Fahrrad zum Fahren gebracht werden.

AKKUMULATOREN

Die Firma *MES DEA* startete 2003 ihr Vorhaben **Niedertemperatur-Zebrabatterie** [8]. Durch bestimmte Zusätze zur herkömmlichen Zebra-Batterie (Fig. 4) soll so die Betriebstemperatur wesentlich herabgesetzt und so die Nachteile einer Hochtemperaturbatterie eliminiert werden. Die Ergebnisse werden ca. Mitte 2005 vorliegen.

Nationale Zusammenarbeit

Die Vernetzung ergibt sich im Programm *Verkehr/Akkumulatoren* insbesondere durch die Eigeninitiative der Projektnehmer. Erinnert sei in diesem Zusammenhang an das Kompetenznetzwerk der Automobilingenieure. Die Knappheit der öffentlichen Mittel machen die konstruktive Zusammenarbeit der einzelnen Akteure notwendig. Das Programm nutzt seinen Einfluss, um koordinierend zu wirken. An einer inzwischen etablierten, ca. jährlich stattfindenden Forschungstagung des BFE wird diese Koordination, die Vernetzung und der Informationsaustausch speziell gefördert. Im Berichtsjahr fand diese Tagung mit ca. 100 Teilneh-

mern im Rahmen der Sektorkonferenz Mobilität in Biel statt. Ein Tagungsband mit sämtlichen Präsentationen ist verfügbar. Durch das langfristige Engagement des BFEs wurde die Weiterentwicklung von Kompetenzzentren an in den Instituten der (Fach-)Hochschulen und die Bildung von Netzwerken wie dem Automotive Competence Network gefördert und gestärkt. Die Zusammenarbeit der ETH Institute inkl. PSI, EMPA, den Fachhochschulen und der Industrie ist gut etabliert und es findet ein reger Erfahrungs- und -Informationsaustausch statt.

Internationale Zusammenarbeit

Im EU-Projekt **CLEANER DRIVE** [9] wurde eine Umweltbewertungsmethode für Autos entwickelt, welche auf einer Website interaktiv abgefragt werden kann. Das auf drei Jahre angesetzte Forschungsprojekt hat zum Ziel, das Know-How, die Erfahrungen und die laufenden Aktivitäten hinsichtlich Markteinführung von umweltschonenden Fahrzeugen in europäischen Ländern zu koordinieren. Dabei soll eine konsistente Methodik für eine Umweltbewertung von Fahrzeugen entwickelt und im Sinne eines Pilotprojekts auf einer Website getestet werden. Als weiteres Ziel soll eine Entscheidungshilfe für die Fahrzeugbeschaffung erarbeitet werden, welches dazu beiträgt, den Umweltkriterien beim Fahrzeugkauf vermehrt Beachtung zu schenken (Hauptzielgruppe: Flottenbetreiber). Schliesslich sollen die Hindernisse für die Einführung von gasförmigen Treibstoffen von Seiten der Infrastruktur untersucht werden, vor allem im Hinblick auf Brennstoffzellenfahrzeuge.

Im Berichtsjahr haben die Partner des Konsortiums die in England entwickelte Methodik für die Umweltbewertung von Autos auf 6 weitere Länder übertragen. Als kritische Punkte haben sich der Lärm und Biotreibstoffe erwiesen, beide mangels ausreichender Datengrundlagen. Der Ansatz, die Input-Daten für das Umweltbewertungsmodell zentral für alle Länder zu erfassen, konnte sich nicht durchsetzen, vorab aus wirtschaftlichen Gründen. So werden die Daten weiterhin in allen Ländern individuell erhoben.

In der Schweiz hat das Thema der Umweltbewertungssysteme mit der Einführung der *energie-Etikette* für Personenwagen an Aktualität gewonnen. Dieses Thema haben die Projektverantwortlichen an einem Workshop zu einem *EcoCar*-Label und an der Generalversammlung von *e'mobile* präsentiert.

Seit August 2003 ist die erste Version der Website www.cleaner-drive.ch online. Die bisher eingegangenen Feedbacks sind sehr unterschiedlich. Die Komplexität und Vielfalt der Informationen in der vorliegenden Form scheint noch zu gross zu sein. Deshalb hat die Projektleitung beschlossen, die Website nicht mehr selbständig weiter zu führen. Stattdessen sollen möglichst viele Bereiche in die aktuelle Website von *e'mobile* integriert werden. Spezifische Bereiche wie das Umweltbewertungssystem werden über ein Portal *Cleaner Drive* erschlossen.

ELEDRIVE [9] ist ein thematisches Netzwerk zum Thema Brennstoffzellenfahrzeuge, das keine eigentlichen Forschungsarbeiten umfasst, sondern ausschliesslich dazu dient, die zahlreichen und verschiedenartigen Akteure rund um Brennstoffzellenfahrzeuge zusammenzubringen. Im Vordergrund stehen die Abstimmung der unterschiedlichen Informationsbedürfnisse, die Anforderungen an die verschiedenen Anwendungen, einheitliche Testmethoden, Normierungsfragen sowie Empfehlungen für Entwicklungsstrategien. Zu den Teilnehmern gehören Automobilhersteller inkl. Komponenten- und Infrastrukturhersteller, Motoren- und Treibstoffindustrie, Organisationen, welche sich mit innovativen Transportsystemen befassen, Behördenvertreter sowie Marketingfachleute und Anwender. Als Beobachter vertritt *e-mobile* die Interessen der Schweiz. Ein Schwerpunkt war

im Berichtsjahr die Durchführung eines Workshops, an dem unter anderem die Beteiligung am 6. Rahmenprogramm, eventuell in der Form eines Networks of excellence, diskutiert wurde. Im Juli 2004 ist ein durch *e'mobile* organisierter **ELEDRI**VE-Workshop im Rahmen des *Fuel Cell Forums* in Luzern geplant. Die im ersten Projektjahr festgestellte Zurückhaltung bei der Offenlegung von Informationen durch die Industrie-Vertreter konnte nicht überwunden werden. Der EU-Delegierte in **ELEDRI**VE, rief zu einer aktiven Mitarbeit vor allem der Industriepartner auf.

Im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms **E-TOUR** [10] – Schweizer Projektpartner ist die Firma *Interface* – konnten die Auswirkungen des Kaufs eines elektrischen Zweirads auf das Mobilitätsverhalten vertieft untersucht werden. Über 600 Haushalte nahmen an der Untersuchung teil, 262 füllten vor und ein Jahr nach dem Kauf ein Mobilitätsprotokoll aus und machten weitere Angaben zu ihren Fahrleistungen. Die Wirkungen des **P+D**-Projekts *NewRide* können deshalb genauer bestimmt werden, als dies normalerweise in vergleichbaren Programmen der Fall ist. In der Deutschschweiz werden mit E-Bikes pro Werktag vom hauptsächlichsten Fahrer durchschnittlich ca. 3.1 Autokilometer ersetzt. Energieverbrauch, CO₂-, NO_x- und PM10-Emissionen von Motorfahrzeugen gingen bei den Haushalten mit Elektro-Zweirädern um ca. 5% zurück.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

VERKEHR

Die EMPA Dübendorf (Abt. Verbrennungsmotoren/Feuerungen) und die ETH Zürich (Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme und Institut für Mess- und Regeltechnik) in Zusammenarbeit mit der *Robert Bosch GmbH*, der *Volkswagen AG*, der *Corning GmbH* und der *Engelhard Technologies GmbH* entwickelten das **Clean Engine Vehicle** (CEV) [12]. Ziel des Projektes war es, mit einem auf monovalenten Erdgasbetrieb umgebauten Fahrzeug 30 % niedrigere CO₂-Emissionen als ein vergleichbares Benzinfahrzeug zu erreichen sowie gleichzeitig die kalifornischen *SULEV*- und die europäischen *Euro-4*-Grenzwerte einzuhalten. Als Versuchsträger diente ein VW Polo mit dem 1.0 Liter-Benzinsaugmotor. Im Vergleich zu einem ähnlich motorisierten Benzinfahrzeug konnten die CO₂-Emissionen um 31 % auf 109.5 g pro km reduziert werden. Dies entspricht ca. einem Benzinverbrauch von 4.7 l Benzin pro

100 km. Es konnte auch gezeigt werden, dass das so optimierte Erdgasfahrzeug deutlich tiefere Schadstoffemissionen verursacht, als dies mit herkömmlichen Fahrzeugen der Fall ist.

Die Arbeitsgemeinschaft *Gasverbund Mittelland* und *Rinspeed AG* entwickelten im Berichtsjahr in Zusammenarbeit mit weiteren Partnern das Projekt **Trilogie Bedouin** [13]. Basis hierzu war der von der *Rinspeed AG* getunte und auf den Erdgasbetrieb umgerüstete *Beduin*. Mit diesem leistungsstarken, bewusst überzeichneten Fahrzeug sollen beim Publikum die leider noch vorhandenen Vorurteile zu Erd- und Biogas als Treibstoff abgebaut werden. Neben diesem *Eye-Catcher* werden von der Arbeitsgemeinschaft an nationalen und internationalen Ausstellungen realitätsnähere, kaufbare Erdgasfahrzeuge ausgestellt. Am *internationalen Autosalon* von Genf und an der IAA in Frankfurt wurden im Berichtsjahr je ein Erdgasfahrzeug von *Audi* und von *Opel* mit dem

gleichen Farblack wie beim *Bedouin* vorgestellt. Durch diese medienwirksamen Auftritte konnten weltweit vermutlich über 750 Mio. Personen zur Thematik Erdgas als Treibstoff sensibilisiert werden. Vermutlich wichtiger ist jedoch das Resultat, dass die Arbeitsgemeinschaft das Interesse der deutschen, französischen und österreichischen Erdgaswirtschaft geweckt hat und bereits vertiefte Gespräche mit den jeweiligen Vorständen geführt wurden. Der Gasverbund Mittelland gründete 2003 die Gesellschaft *GasMobil*, welche die Promotion von Erdgas als Treibstoff als Aufgabe hat. Ein wichtiger Aspekt hierbei ist der Aufbau eines Netzes von Erdgastankstellen in den grossen Agglomerationen und entlang der Hauptverkehrsachsen.

Das Projekt **Mobilitätsmodul** untersucht im Rahmen der **novatlantis-Pilotregion Basel** [14] Chancen und Risiken der Einführung von innovativen Treibstoffen mit Vorteilen für Klimaschutz und Luftqualität - speziell Erdgas, Biogas und Wasserstoff. Diese Studie soll Förderprogramme für Erdgasfahrzeuge, sowie Forschungsprogramme zu Biogas und Wasserstoff wirksamer machen, indem Erfolgskriterien für Markteinführungsprogramme sowie die Wirksamkeit verschiedener Kommunikations- und Marketingstrategien systematisch untersucht werden. Zentraler Ansatzpunkt bei der Studie von PSI und *sustainserve* ist die Durchführung von Besprechungen in Fokusgruppen mit Bürgerinnen und Bürgern in Basel, um einen Überblick über typischen Haltungen und Assoziationen zu umweltschonenden Fahrzeugen im Allgemeinen und Erdgasfahrzeugen und Wasserstoffautos im Besonderen zu gewinnen. Weiterhin werden internationale Erfahrungen anhand verschiedener Fallbeispiele ausgewertet, um Erkenntnisse für die Markteinführung in der Schweiz zu gewinnen. Aufbauend auf den Ergebnissen des *Mobilitätsmoduls* bildet das Projekt **Innovative Fahrzeugflotte Basel** im Rahmen der Pilotregion Basel eine Plattform zur Vorbereitung von Demonstrationsprojekten für besonders innovative Erdgas- und Wasserstoff-Fahrzeuge. In Partnerschaft mit dem BFE, den Ämtern für Umwelt und Energie beider Basel, dem *Gasverbund Mittelland*, den Industriellen Werken Basel, der Handelskammer beider Basel sowie verschiedener Unternehmen werden Demonstrationsprojekte für den Alltagseinsatz von CEV- Erdgasfahrzeugen der EMPA/ETH vorbereitet und Kontakte mit Automobilherstellern und weiteren Partnern aufgebaut. Eine wissenschaftliche Begleitung umfasst eine repräsentative Marktumfrage zu alternativen Treibstoffen sowie eine Wirkungsanalyse einer innovativen Fahrzeugflotte im Raum Basel.

Mit Unterstützung des BFE entwickelte die *awtec AG* iden Erdgastankstutzen **CNG-H₂ Easyconnect** [15]. Ende 2003 konnte die Firma einen, gegenüber den heute im Einsatz stehenden Tankstutzen, ergonomisch und sicherheitstechnisch stark verbesserten Stutzen präsentieren, mit welchem nicht nur reines Erdgas, sondern auch eine Mischung von Erdgas mit Wasserstoff betankt werden kann. Diese Entwicklung soll in der Folge bei einer an der Entwicklung beteiligten Schweizer Maschinenfabrik umgesetzt werden.

NewRide [16] befasste sich im Berichtsjahr weiterhin mit der Förderung elektrischer Zweiräder (E-Bikes und E-Scooter). Die Zahl der beteiligten Gemeinden stieg von 9 im Jahr 2002 auf 21 aus 11 Kantonen im Berichtsjahr. Die Zusammenarbeit mit Händlern, Produzenten und Importeuren konnte gefestigt werden. Das neue Produkt *Road-Show*, eine betreuten Wanderausstellung, hat sich sehr bewährt. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis ist sehr gut, und das gleiche dürfte für die Effektivität der Massnahme gelten. Günstig ausgewirkt hat sich auch eine Stabilisierung auf Produzentenseite sowie die Lancierung eines neuen Fahrzeugtyps mit Tiefeinstieg, speziell geeignet für weniger sportliche Fahrerinnen und Fahrer. All dies führte zu einem erfreulichen Anstieg der Verkäufe bei den E-Bikes um ca. 50% auf aktuell 1800. Davon dürfte die Hälfte direkt auf das Programm *NewRide* zurückzuführen sein. Auf tiefem Niveau stagnierten die Verkäufe von E-Scootern, was nicht zuletzt eine Folge des ungenügenden Händlernetzes sein dürfte. Bei einer weiterhin günstigen Entwicklung scheint das anvisierte Ziel von 4000 Verkäufen elektrischer Zweiräder dank *NewRide 2001-2004* nach wie vor erreichbar. Eine wesentliche Unterstützung erhält das Unterfangen dadurch, dass sich E-Bike-Händler bezüglich den Spezialitäten des E-Bikes im Rahmen eines angrenzenden BFE-Projekts einer gezielten Schulung unterziehen können.

Unterstützt vom BFE, in Zusammenarbeit mit der *Biketec AG*, entwickelt die *ZEM Europe GmbH* das **e-ZEM** [17]. Ein Fahrzeug auf der Basis ihres *ZEM (Zero Emission Mobil)* wird mit einer vom E-Bike Flyer stammenden Elektromotor-Unterstützung ausgerüstet. Die Strassentauglichkeit, die Sicherheit und die Marktchancen des ZEM werden hiermit, bei minimalstem Energiebedarf, wesentlich verbessert.

Die Firma *msy management symbiose consulting GmbH* entwickelt in Zusammenarbeit mit der Partnerfirma *Tribecraft* Zürich das **Laufrad Perped** [18]. Projektziel war ein innovatives, spassiges, leichtes, gesundheitsförderndes und um-



Figur 6: Durch das Engagement von Miss Schweiz an der New-Ride-Road-Show konnte ein hervorragendes Medienecho erzielt werden.

weltfreundliches Laufrad, welches Ende November 2003 als Prototyp fertig entwickelt wurde. Das Testmodell ist ein ansprechendes Gefährt von minimaler Grösse und Gewicht sowie leichtem Handling, welches die ergonomischen Ansprüche der Zielgruppen berücksichtigt. Die vielen positiven Feedbacks der Testpersonen diverser Alters- und Gewichtsgruppen zeigen, dass das Perped gute Marktchancen besitzt. Der seriennahe Prototyp wird nochmals getestet und nach der Freigabe im Januar 2004 startet die Produktion einer Null-Serie für den Verkauf.

Das Projekt **e-rent** [19] baut in der Gemeinde Wohlen BE einen Mietservice für Elektromobile auf. Im Jahr 2003 wurde das Angebot gegenüber dem Vorjahr erweitert. Per Ende 2003 sind nun ca. 30 Personen NutzerInnen des **e-rent**-Angebots. Betrieb und Wartung sind sichergestellt. Das Projekt hat sich trotz den erhöhten Anstrengungen im Marketing aber langsamer entwickelt als im ursprünglichen Zeitplan vorgesehen. Gleichwohl stellt es für die Nutzer eine funktionierende und sehr energieeffiziente Form der Mobilität dar.

Die Arbeiten des im Berichtsjahr gestarteten Projektes **Citybike SWISS** [20] der Firma **Rent a Bike** waren auf die Überprüfung der technischen Machbarkeit, die Erarbeitung von technischen Variantenstudien und eines Businessplans für die einzelnen Varianten (Stufe Vorprojekt) eines intelligenten Velos fokussiert. Dabei hat es sich gezeigt, dass eine Lösung beispielsweise mit elektronischem Schloss, Kartenleser etc. zwar technisch machbar, aber betriebswirtschaftlich nicht sinnvoll ist. Den weiteren Abklärungen wird deshalb folgendes Konzept zu Grunde gelegt: Ein Terminal steuert 15 - 20 Velos, die über ein geeignetes Medium (Smart Card, Handy) bezogen werden können. Die Systemkosten können so auf 15

– 20 Velos verteilt werden. Neben der finanziellen Entlastung liegt der Hauptvorteil darin, dass die Sicherungslösung (Schloss) für alle Zugangsmedien kompatibel ist.

Folgende zwei Variantenstudien wurden am 1. Oktober in Angriff genommen: **Mobility fürs Velo:** Die Velos können mit einer Smart Card bezogen werden. An zentralen Standorten wird ein Automat – analog einem Parkhaus oder S-POS der SBB – stationiert, welcher 15 – 20 Velos für die Freigabe des Schlosses ansteuert. Der Kunde erhält nach dem Kaufvorgang einen Code, mit welchem das gewählte Velo bezogen werden kann. Er bezahlt die Miete über eine Monatsrechnung. **Dial a Bike:** Die Ausleihe des Velos mit dem Handy soll ermöglicht werden. An zentralen Standorten wird ebenfalls ein Automat stationiert, welcher die Velos ansteuert. Die Mietgebühren werden über Eingabe eines Codes per Handy bezahlt. Die Handy-Kunden erhalten eine Quittung per SMS und der Betrag wird der nächsten Handy-Rechnung belastet. Die nächsten Schritte betreffen nun die Wahl einer der beiden technischen Varianten und die Erstellung eines detaillierten Pflichtenheftes. Mit der Entwicklung soll im Mai 2004 begonnen werden.

Die **DemoEx GmbH** optimiert mit der Unterstützung des BFE ein **Gerät zur Demonstration des CO₂-Effekts** [21]. An Ausstellungen, an Messen, in Vorlesungen und im Unterricht soll den Betrachtern die Klimawirkung von CO₂ realitätsnah demonstriert und ein bewusster Umgang mit Energie angeregt werden.



Figur 7: Demogerät CO₂-Effekt sensibilisiert für die Klimaproblematik

Seit Mai 2000 verkehrt die **Solarfähre Helio** [22] zwischen den Gemeinden Gaienhofen (D) und Steckborn (CH) am Untersee des Bodensees. Dank dem sonnenintensiven Sommer konnte die Fähre besonders ausgiebig genutzt werden. Die

Solarfähre konnte zusätzlich als *Schwimmendes Klassenzimmer* didaktisch genutzt werden. Der Impuls, der mit der Einrichtung der Solarfähre gesetzt wurde, hat sich bewährt. Die Idee einer zukunftsfähigen Mobilität ohne fossile Energieträger ist auf dem Bodensee bereits Realität.

Mit Unterstützung des BFE realisierte die *Société de navigation sur les lacs de Neuchâtel et Morat* das Pilotprojekt **Bulpe d'étraver M/S «Fribourg»** [23]. Dieses Projekt verbessert mit hydrodynamischen Massnahmen am Vordersteven die Wasserlage des Schiffes und mit motorischen Massnahmen den Wirkungsgrad des Dieselantriebes. Insgesamt können so im Pilotversuch 26 % Treibstoff eingespart werden.

Der *SVFER (Schweizerischer Verband zur Förderung energieeffizienter Reisen)* führte im Berichtsjahr, mit Unterstützung von EnergieSchweiz, vier einwöchige sogenannte **TwikeTours** [24] mit dem Elektrofahrzeug *Twike* durch. Insgesamt nahmen daran ca. 60 Personen teil. Das Projekt erzielte hierbei seine Wirkung vor allem bei der Sensibilisierung der Bevölkerung für eine energieeffiziente Mobilität. Diese wurde durch eine gelungene Berichterstattung in Reisezeitschriften (z.B. *Via*; Auflage 236 000 Ex.) erreicht.

AKKUMULATOREN

Die HTA Zentralschweiz trieb die Entwicklung des **TOHYCO-Rider Kleinbus** [25] im Berichtsjahr weiter voran. Der Energiespeicher wurde mit neuen Kondensatoren höchster Energiedichte bestückt, welche von der Firma *Maxwell PowerPac*, entwickelt und hergestellt wurden. Das Gesamtsystem wurde so verbessert, dass der Bus voraussichtlich vom Mai bis Oktober 2004 zwischen dem Hauptbahnhof Luzern und dem Verkehrsmuseum zuverlässig im Linienbetrieb eingesetzt werden kann.

Das Projekt **Alboca** [26] der Fachhochschulen Bern und Biel hat die Verlängerung der Lebensdauer von Batterien zum Ziel. In Bussen, welche vor allem im städtischen Linienverkehr eingesetzt werden, dienen sie dem Starten und Erreichen einer Lebensdauer von lediglich etwa 1,5 Jahren. Bei einem Personenwagen rechnet man mit einer Lebensdauer von 4 bis 5 Jahren. Geht man von der mittleren Lebensdauer eines Linienbusses mit 15 Jahren aus, bedeutet dies, dass die Starterbatterie etwa 10-mal ersetzt werden muss. Entgegen ersten Annahmen ist aber nicht der Anlassvorgang der Grund für diese kurze Lebensdauer, sondern die Entladung der Batterie bei den Endstationen. Dabei wird der Motor abgestellt und die elektrischen Verbraucher werden von der Batterie ge-

spiesen. Die Stromstärke beträgt 20 bis 30 A. Bei einem Linienbus ergibt dies im Jahr etwa 15'000 Entladezyklen. Auch wenn diese Entladungen nur einen kleinen Teil der Entladekapazität betragen, führt dies zu einer begrenzten Lebensdauer der Batterie. Bereits heute werden deshalb bei Linienbussen zyklusfeste Traktionsbatterien anstelle der Starterbatterien eingesetzt. Ein weiteres Problem zeigt sich bei den untersuchten Bussen durch den relativ hohen Stromverbrauch der Billetautomaten während der Nacht. Es besteht die Absicht mit Hilfe von Boostcaps die Pause bei den Endstationen zu überbrücken und damit die Anzahl Zyklen massiv zu verringern. An den Fachhochschulen Bern und Biel wurde ein Prototyp entwickelt, welcher die Funktion eines derartigen Systems demonstriert. Als nächster Schritt ist der Einbau einer Testeinrichtung in einem Linienbus geplant.

Das Projekt **OPAL** [26] der Fachhochschulen Bern und Biel untersucht Ansätze zur Verbesserung der Lebensdauer von Blei-Traktionsbatterien am Beispiel des Elektrofahrzeuges *SAM*. In den bisher ausgeführten Arbeiten wurden folgende Erkenntnisse und Empfehlungen erarbeitet: Zur Überwachung des Betriebszustandes eines Batteriesystems ist die alleinige Messung der Gesamtspannung ungenügend. Wesentlich aussagekräftiger ist die Überwachung jeder einzelnen Zelle, oder mindestens jedes einzelnen 12 V-Blocks. Weil dies aus Kostengründen aber kaum realisierbar ist, empfiehlt sich die Verwendung eines Mittelabgriffes für die Spannungsmessung. Für die Batterie des *SAM*, welche aus 14 Batterieblöcken zu je 12 V besteht, könnte die Spannung der ersten 7 Batterieblöcke mit derjenigen der nächsten 7 Batterieblöcke verglichen werden. Bei einer Spannungsdifferenz von 2 Volt oder mehr kann angenommen werden, dass ein Fehler vorliegt. Die relativ grossen Gewichtsverluste (Wasserverluste) der Batterien während der ersten Messzyklen sollen mit folgenden Massnahmen behoben werden: Ersatz der zweiten I-Phase während der Ladung durch eine Verlängerung der U-Phase. Die Ladespannung muss in Funktion der Batterietemperatur geregelt werden! Beim Testbeginn wurde die Abschaltspannung mit $U = 136 \text{ V}$ definiert. Das entspricht einer Blockspannung von 9,7 V. Bereits bei den ersten Versuchen zeigte sich, dass die Spannung eines Batterieblocks bis auf 9,4 V absank. Aus diesem Grunde wurde die Abschaltspannung auf 147 V erhöht. Das entspricht einer Blockspannung von 10,5 V. Die Tiefentladung der Batterie ist zu vermeiden! Wichtig ist die Temperaturüberwachung und -regelung (Isolation, Heizung und Kühlung) der Batterie. Bei Beginn der Ladung sollte die Temperatur vorzugsweise über 30°C betragen. Die Batterien müssen zudem gut

belüftet sein. Ein identischer Zwischenraum zwischen allen Batterien sowie eine zusätzliche Belüftung mit einem Ventilator sind zu empfehlen. Dies erlaubt eine Kühlung, falls die Temperatur zu

stark ansteigt (z.B. über 45°C). Trotz dieser Verbesserungen konnte mit dem vorhandenen Batteriesystem die Lebensdauer noch nicht wesentlich erhöht werden.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Im Berichtsjahr wurden nur wenige Projekte abgeschlossen. Ein herausragendes Resultat stellt die industrie- und umsetzungsnahe Entwicklung des CEV der EMPA dar. Für die gegenwärtig schwierigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ist auch die Zunahme der E-Bike-Verkäufe im *NewRide*-Programm beachtenswert. Diese Verkaufsentwicklung wurde durch die Lancierung des E-Bikes *Flyer C1*, einem ausgereiften, marktgerechten und preiswertem Produkt massgeblich unterstützt. Der Verbrauch von nur 15 g Wasserstoff pro 90 km beim *Pac-Car* ist ein Erfolg. Mit dem *Pac-Car II* sollen bis 2005 noch bessere Werte erzielt werden.

Auf internationaler Ebene war die Lancierung der Hybrid-Fahrzeuge von *Toyota* und *Honda* mit 4.4

resp. 4.9 Litern Verbrauch pro 100 km sowie das Nachziehen der deutschen Automobilindustrie bezüglich der Dieselpartikelfilter herausragende Ereignisse. Daneben ist bei der Automobilindustrie eine deutliche Abkühlung der Brennstoffzellen-Euphorie zu verspüren. Wegen ihren grossen Vorteilen darf diese Entwicklungsrichtung jedoch nicht vernachlässigt werden.

Der Weg in die Zukunft bleibt auch in den kommenden Jahren spannend. Erdgas als Treibstoff, Hybrid-Technologien, verbesserte Systeme bei den Diesel, wie auch den Ottomotoren, verbesserte Getriebetechnologien und modularer Leichtbau versprechen weitere Effizienzgewinne und CO₂-Einsparpotential. Eine Herausforderung bleibt das Verhalten der Verkehrsteilnehmer.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2003 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden

- [1] L. Guzzella, C. Onder, D. Ambühl, A. Schilter, (guzzella@imrt.mavt.ethz.ch) ETH-Zürich: **a) Eco-Drive-Fahrweise ab dem Modelljahr 2010** (SB) • **b) Erdgasbusse** (SB) • **c) PALOS II Optimale Antriebssysteme für Leichtfahrzeuge** (JB) • **d) Pac-Car** (SB) www.ethz.ch.
- [2] G. Moreni (gianni.moreni@rapp.ch) ARGE Rapp Trans, Zürich, Interface, Luzern: **Finanzielle Anreize für effiziente Fahrzeuge**, (JB), www.rapp.ch.
- [3] M. Horlacher, (thomas.efler@bluewin.ch) Horlacher Möhlin: **Livio21**, www.horlacher.com.
- [4] A. Fuchs, (andreas.fuchs@hti.bfh.ch) HTI Bern: **a) Ultraleichtscooter** (JB) • **b) Energiemanagementsystem** (JB), <http://www.hta-be.bfh.ch/>.
- [5] A. Naef / H.-J. Gisler, (inf@hess-ag.ch) Carrosserie Hess, Bellach: **Swisstrolley III** (JB), www.hess-ag.ch.
- [6] M. Schütz / D. Irany, (martin.schuetz@tribecraft.ch), Tribecraft, Zürich: **Wetterschutz** (JB), www.tribecraft.ch.
- [7] M. Hoeckel, (michael.hoeckel@hti-bern.bfh.ch) HTI Bern/Biel: **Brennstoffzellen-SAM** (JB), www.hta-bi.bfh.ch/E/Laboratories/FuelCell.
- [8] C. Dustmann, (cdustmann@mes-dea.ch) MES-DEA, Stabio: **Niedertemperatur-Zebra Batterie** (JB) www.cebi.com.
- [9] U. Schwegler, (ursschwegler@bluewin.ch) e'mobile, Fischen: **a) CleanerDrive** (JB) • **b) ELEDRIVE** (JB), <http://www.e-mobile.ch>.
- [10] U. Haefeli, (haefeli@interface.ch) Interface, Luzern: **e-tour** (JB), www.interface-politikstudien.ch.

Liste der P+D-Projekte

- [11] N. Oberholzer, (oberholzer@comm-care.ch) Locher, Schmill, Van Wezemael & Partner, Basel: **Reifen pumpen – Treibstoffsparen – sicher fahren** (SB), www.comm-care.ch.
- [12] Ch. Bach, (christian.bach@empa.ch), EMPA Dübendorf: **Clean Engine Vehicle** (SB), www.empa.ch/abt137.
- [13] F. Rinderknecht / K. Schmidlin, (fmr@rinspeed.com), Rinspeed, Zumikon: **Trilogie Bedouin** (SB) www.rinspeed.com.
- [14] St. Lienin / B. Kasemir, (stephan.lienin@psi.ch), PSI, Villigen: **Novatlantis-Pilotregion Basel** (JB).
- [15] J. Ganz, (jochen.ganz@awtec.ch), awtec, Zürich: **CNG-H₂ Easyconnect** (SB), www.awtec.ch.
- [16] H. Hofmann, (heidi.hofmann@ikaoe.unibe.ch) Universität Bern: **NewRide** (JB), www.newride.ch.
- [17] R. Frey, (zem@zem.ch) ZEM Europe, Zürich: **e-zem** (SB), www.zem.ch.
- [18] H. Leitner, (hlc@tgnet.ch) msy, Romanshorn: **Laufrad Perped** (SB).
- [19] R. Kiener, (r.kiener@gmx.ch) Gemeinde Wohlen: **e-rent** (JB), www.mobilem.ch.
- [20] S. Maissen, (s.maissen@bro.ch) rent a bike, Zug: **Citybike SWISS** (JB).
- [21] U. Aeschbacher, (huber.demoex@datacomm.ch) DemoEx GmbH, Ebikon: **Demo-Gerät CO₂-Effekt** (JB).
- [22] J. Rohrer, (jakob.rohrer@bluewin.ch), Verein Bodensee, Steckborn: **Solarfähre Helio** (JB), <http://www.solarfaehre.net>.
- [23] D. Wicht, (info@navig.ch) Société de navigation sur les lacs de Neuchâtel et Morat SA, Neuchâtel: **Bulpe d'étraver M/S «Fribourg»**, (JB), <http://www.navig.ch>.
- [24] M. Bolliger, (info@twiketours.ch) SVFER, Bern: **TwikeTours** (SB), <http://www.twiketours.ch/>.
- [25] V. Härrli (v.v.h@bluewin.ch) HTA Zentralschweiz, Horw: **a) Tohyco-Kleinbus mit Scaps** (JB) • **b) SAM-Trottinet** (JB) www.hta.fhz.ch/projekte/samtohyco.
- [26] K. Meier-Engel (Karl.Meier@hti-bi.bfh.ch) HTA Biel: **a) OPAL** (JB) • **b) ALBOCCA** (JB), www.hta-bi.bfh.ch.

Referenzen

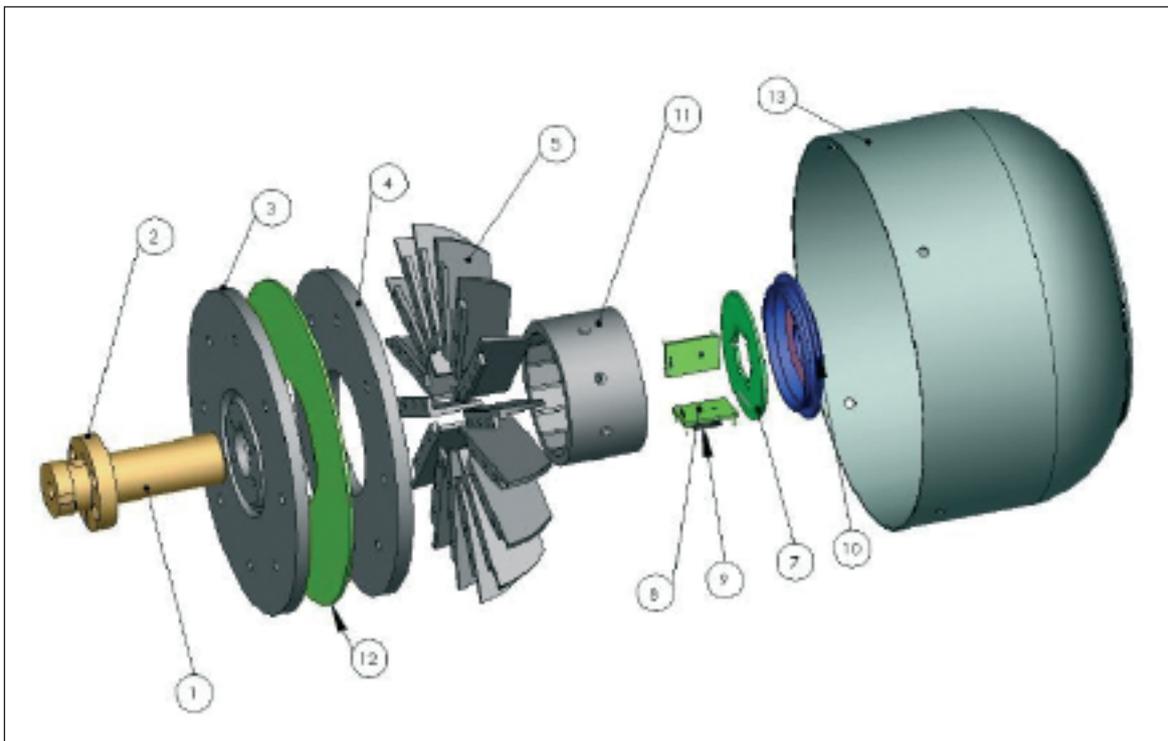
- [27] M. Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch) BFE, Bern: **Programme Verkehr und Akkumulatoren/ Supercaps 2000 – 2003**, <http://www.energie-schweiz.ch/bfe/de/verkehr/forschung/>.
- [28] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007**, download unter: www.energie-schweiz.ch/internet/03095/index.html?lang=de.

ELEKTRIZITÄT

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Roland Brüniger

roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch



Lüfterbereich des innovativen Integraldrives (Quelle: IDS AG)

Mit dem kompakten Integraldrive können gegenüber unregelmäßigen Motoren in der Schweiz etwa 220 GWh eingespart werden. Speziell sind der Zusatzwiderstand (12) und die mitrotierenden Elektronikkomponenten (8, 9) unter der Lüfterhaube (13).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Mit einem Anteil von etwa 20 Prozent am gesamten Endenergiebedarf und mit einem finanziellen Wert des verkauften Stroms von ungefähr CHF 8 Mia. ist die Elektrizität von zentraler, wirtschaftlicher Bedeutung. Übergeordnetes Ziel ist es, den schonenden Umgang dieses wertvollen Energieträgers zu fördern. Das Programm *Elektrizität* ist in die Bereiche *Elektrizitätsnutzung*, *Elektrizitäts-transport* und *Elektrizitätsspeicherung* sowie auf den übergreifenden Bereich *Querschnittstechnologien* unterteilt. In Anlehnung an die Zielsetzung von *EnergieSchweiz* [31], den Stromverbrauchszuwachs von 2000 bis 2010 auf max. 5% zu begrenzen, erfolgt eine Konzentration auf die effiziente und rationelle Elektrizitätsnutzung.

Bei der **Elektrizitätsnutzung** wurden pro Teilbereich spezifische Zielsetzungen festgelegt. Im Themengebiet der *Informations- und Kommunikationstechnik* wurde einerseits angestrebt, die in einem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse in der IT-Ausbildung im Energiebereich umzusetzen. Ferner war es ein erklärtes Ziel, die internationalen Kooperationen weiter zu intensivieren. Im Vordergrund standen dabei die Themen des Server-Schaltens und der Stromverbrauch von Settop-Boxen. Zudem war vorgesehen, im USV-Bereich eine Begleitgruppe mit Teilnehmern aus der Industrie zu etablieren. Obwohl moderne *Haushaltsgeräte* bereits einen hohen Effizienzstandard aufweisen, besteht in spezifischen Bereichen nach wie vor Handlungsbedarf. Die Zielsetzung für 2003 lag darin, diese Bereiche mit einer Grundlagenstudie zu identifizieren.

Rund 45% der elektrischen Energie wird in *Antrieben und elektrischen Motoren* umgesetzt. Mit einem geschätzten Einsparpotential von bis zu 30% (entspricht über 7'000 GWh) weist dieser Bereich das grösste Potential auf. Da Druckluftsysteme klar abgrenzbar sind und ein Einsparpotential von etwa 100 GWh/Jahr aufweisen,

bestand die Zielsetzung, die seit mehreren Jahren angestrebte Machbarkeitsstudie zur Etablierung eines *Kompetenzzentrums Druckluft* anzugehen. Gleichzeitig sollte geprüft werden, wie das in Deutschland laufende Programm *Druckluft-effizient* auch in der Schweiz realisiert werden könnte. Zudem sollte im Falle einer zeitlichen Verzögerung der europäischen Lancierung des *Motor Challenge* Programms die Kontinuität durch die Initiierung eines eigenständigen Projektes in der Schweiz sichergestellt werden.

Im Bereich **Elektrizitätstransport und -speicherung** erfordert nach wie vor das zukunftsorientierte Thema der dezentralen Erzeugungsanlagen die Lösung von technisch anspruchsvollen Problemkreisen. Deren Identifikation und Bearbeitung durch gemeinsame Projekte mit der Branche stellten deshalb wichtige Ziele für 2003 dar. Im technisch orientierten Bereich der **Hochtemperatursupraleitung** wurde als Zielsetzung für 2003 angestrebt, trotz bescheidenen Mitteln eine Kontinuität im Projekt- und Informationsbereich sicherzustellen. Dies umfasst einerseits die unterbruchsfreie Teilnahme am entsprechenden IEA-Implementing-Agreement, und andererseits eine verstärkte Interaktion mit der betroffenen Industrie.

Systemübergreifende Projekte zur Effizienzsteigerung werden unter dem Begriff **Querschnittstechnologie** untersucht, wobei deren Behandlung weitgehend aufgrund von Impulsen der Industrie im reaktiven Sinn erfolgt.

Ein wichtiges Ziel für 2003 bestand auch darin, aufbauend auf dem **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007** [37] die Schwerpunkte im Programm *Elektrizität* in einem Konzept für die gleiche Periode auszuarbeiten. Gleichzeitig sollte die bestehende Internet-Homepage erneuert werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

ELEKTRIZITÄTSTRANSPORT UND -SPEICHERUNG

Da sich das BFE nach der Ablehnung des Elektrizitätsmarktgesetzes im Herbst 02 rasch in Richtung einer neuen Elektrizitätswirtschaftsordnung (ELWO) bewegte, verloren die ursprünglich vom Amt vorgesehenen Aktivitäten einer spezifischen Forschungsinitiative ihre akute Bedeu-

tung. Deshalb wurde – wie früher vorgesehen – schwerpunktmässig die Thematik der dezentralen Erzeugungsanlagen bearbeitet. Erfreulich war, dass im Berichtsjahr eine formelle Vereinbarung zwischen dem VSE (Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen) und dem BFE zur Umsetzung neuer Erkenntnisse des Programms *Elek-*

trizität unterschrieben wurde und damit die gute Zusammenarbeit mit der Branche weiter gefestigt werden konnte.

Um Studenten vermehrt für ein Studium auf dem Gebiet der elektrischen Übertragung und Verteilung zu motivieren, und um neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Gleichstromübertragung zu gewinnen, wurde mit dem Projekt **Démonstrateur pour réseau avec transport d'énergie en courant continu** [1] an der Fachhochschule Yverdon ein Modell einer Gleichstromübertragungsstrecke aufgebaut.

Die starke Zunahme von dezentralen Energieerzeugungsanlagen im Verteilnetz verursacht neue technische Herausforderungen an die Netzbetreiber. Insbesondere im Niederspannungsnetz muss der Spannungserhaltung besondere Aufmerksamkeit geschenkt und dem wachsenden Anteil an Oberschwingungen mit geeigneten Massnahmen entgegnet werden. Diese und weitere Erkenntnisse konnten im Forschungsprojekt **Zunahme der dezentralen Energieerzeugungsanlagen in Verteilnetzen** [2a] gewonnen werden, da Dank den von kooperierenden Elektrizitätswerken zur Verfügung gestellten Netzdaten umfangreiche Simulationen realitätsnah durchgeführt werden konnten.

In enger Zusammenarbeit und Kooperation mit dem BFE-Programm *Solarchemie / Wasserstoff* wurde das Projekt **Einsatz von Druckluftspeichersystemen** [3] gestartet. Dieses Projekt soll nicht nur geeignete Einsatzmöglichkeiten der Druckluftspeicherung identifizieren, sondern insbesondere im Vergleich zu alternativen Speichertechnologien auch die technischen und wirtschaftlichen Hürden analysieren, die ein neues, innovatives, praktisch isothermes Druckluftspeicherkonzept bis zur Markteinführung überwinden muss. Im Berichtsjahr wurden Druckbehälter, Energietransformation, Elektronik und Antrieb inkl. Wirkungsgradbetrachtungen untersucht.

Mit dem Projekt **Wechselstromkorrosion an Pipelines** [4] wird der Einfluss von elektrischen Energieübertragungsleitungen auf die Korrosionsbildung an Erdgasleitungen untersucht. Neben Feldmessungen wurde eine spezifische Messmethode auf elektrochemischer Basis zur Abschätzung des Korrosionsrisikos identifiziert.

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 [35] zu finden.

HOCHTEMPERATURSUPRALEITUNG (HTSL)

Es ist von grosser Bedeutung, dass die Schweiz den Kontakt zur weltweiten Spitzenforschung im Bereich der HTSL beibehält. Neue Entdeckungen sind in diesem Gebiet immer möglich; Es sei nur auf das im 2001 entdeckte, neue Supraleitermaterial MgB_2 verwiesen. Mit der schweizerischen Teilnahme am **Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector** [5] der Internationalen Energie Agentur (IEA) wird dies sichergestellt. Im Jahr 2003 wurden zwei Informationstreffen besucht. Beide waren vor allem dem Thema der supraleitenden Kabel (siehe Fig. 1) gewidmet. Die 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. Zudem wurde die Weiterführung des IEA-Agreements um 2 Jahre beschlossen.

Mit dem Projekt **Marktpotential von supra-leitenden Strombegrenzern (SSB)** [6] wurde eine Übersicht über die realen Anwendungsmöglichkeiten von SSB geschaffen. Sowohl mittels Simulationen als auch aufgrund umfangreicher Gespräche mit Interessierten konnte die attraktivste Einsatzmöglichkeit in der Kupplung von Mittelspannungsnetzen identifiziert werden. Die technischen Eigenschaften von heute realisierbaren SSB erfüllen die Anforderungen von Anwendungen in Netzkupplungen, müssen aber für den Einsatz noch verbessert werden. Die Studie ist eine wesentliche Grundlage zum Entscheid, ob im Schweizer Netz ein entsprechender Prototyp entwickelt und installiert werden soll.



Figur 1: HTSL-Prototypen-Kabel von Sumitomo (Quelle: Sumitomo Electric, Japan)

Im **National Center of Competence in Research MaNEP** (*Materials with Novel Electronic Properties*) [36] des schweizerischen Nationalfonds befassen sich insgesamt 8 Institute und Industrien in theoretischen oder experimentellen Arbeiten mit HTSL-Supraleitern.

ENERGIE UND INFORMATIONSTECHNIK

Mit dem **Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik** [7] an der ETHZ wird die Förderung eines rationelleren Energieeinsatzes in der Informationstechnik und Unterhaltungselektronik unterstützt. Dazu werden relevante Information gesammelt, aufbereitet und verbreitet. Da es sich bei der Informations- und Kommunikationstechnik um ein internationales Marktsegment handelt, wird den Ereignissen und Aktivitäten im Ausland speziell Beachtung geschenkt – dies nicht nur um Doppelspurigkeiten zu vermeiden, sondern auch um Synergien zwischen den Aktivitäten im In- und Ausland zu nutzen.

Server werden in der Nacht und an Wochenenden speziell in kleinen und mittleren Betrieben kaum genutzt; trotzdem sind sie meist rund um die Uhr in Betrieb. Aufgrund von Studienergebnissen, die 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, beschäftigen sich diverse Projekte mit dieser Thematik. Auf der Basis eines kostengünstigen Embedded Web-servers wurde im Projekt **Energieeffizientes Servermanagement** [8a] ein Funktionsmuster einer extern installierbaren, intelligenten Schaltleiste entwickelt. Die grundsätzliche Machbarkeit konnte damit belegt werden. Damit können EDV-Server zu vorgegebenen Tageszeiten kontrolliert herunter- und heraufgefahren werden. Im Folgeprojekt **Energieeffizientes Servermanagement im praktischen Betrieb** [8b] wird nun in unterschiedlichen IT-Umgebungen die Funktionstauglichkeit dieser Schaltleiste (siehe Fig. 2) eingehend geprüft und benutzerfreundlich optimiert. Im Projekt **Auswirkungen von periodischem Ein- und Ausschalten auf die Server-Hardware-Zuverlässigkeit** [9] konnte ferner wissenschaftlich belegt werden, dass periodisches Schalten eines Servers keinen relevanten Einfluss auf seine Lebensdauer hat.

Auf Herstellerseite sind verschiedene Ansätze für eine Energieverwaltung bei Servern vorhanden. In der Welt der *Windows*®-Server wird der von den Personal Computern her bekannte ACPI-Standard (Advanced Configuration and Power Interface) übernommen. Verschiedene Hersteller garantie-



Figur 2: Prototyp der intelligenten Schaltleiste für das Server-Management (Quelle: EMT AG, Ermatingen)

ren zwar die Systemkompatibilität gewisser Low-end-Server mit dem ACPI-Standard. Wie aber die Ruhezustände von ACPI in der Serverumgebung in der Praxis funktionieren und wo die Grenzen sind, ist nicht bekannt. Im Projekt **Energieoptimaler Einsatz der ACPI-Funktionalität** [10a] sollen Erfahrungen und Grenzen von ACPI im Praxistest bei Low-end-Servern gewonnen werden. Zum Testen und Sammeln von Erfahrungen ist ein Low-end-Server mit dem Betriebssystem *Windows 2003* aufgesetzt worden.

Das digitale Fernsehsystem wird einen wachsenden Anteil am Stromverbrauch haben. Die EU schätzt den Stromverbrauch für diese Geräte im Jahr 2006 auf 23'000 GWh und das dazugehörige Einsparpotential durch Verbesserung der Energieeffizienz wird mit 15'000 GWh veranschlagt. Ein zentraler Gateway, auch Set-Top-Box genannt, wird in der Lage sein, mehrere Endgeräte zu steuern. Sowohl die Lieferanten der Informationsdienstleistungen wie Filmverleiher, Fernsehanstalten und Betreiber von Netzen als auch die Hersteller der Endgeräte (TV, DVD-Player, HiFi-Anlage, etc.) müssen in das zukünftige Energiemanagement der Endgeräte eingebunden werden, da in Zukunft bidirektionale, interaktive, zeitgesteuerte Dienste in Anspruch genommen werden. Im Projekt **Grundlagen zur Energieeffizienz von Set-Top-Boxen** [10b] sollen mit internationaler Abstimmung erste Grundlagen erarbeitet und insbesondere die zukünftige Entwicklung in der Schweiz untersucht werden.

Mit dem Projekt **Energieeffizienz von USV-Anlagen** [2b] sollen die bisher erarbeiteten Grundlagen über die Auslegung, Qualität und Energieeffizienz von USV-Anlagen mit den Standby-Verlusten erweitert und für eine europäische Umsetzung aufbereitet werden. Die internationa-

len Kontakte wurden einerseits auf EU-Ebene mit den Forschungsbehörden, andererseits durch eine aktive Teilnahme der Schweiz in der betroffenen Working Group der *International Electrotechnical Commission (IEC)* wahrgenommen. Nachdem die Kontakte mit der Schweizer Industrie etabliert und in einer eigenen Trendwatching-Gruppe gebündelt wurden, wird angestrebt, die Umsetzungs-Aktivitäten voranzutreiben. Gleichzeitig wird die Internationalisierung der Thematik ausgeweitet.

Mit dem Projekt **Energieverbrauch von Prozesssteuerungen** [11] wurde dieses bis anhin vernachlässigte Gebiet untersucht. Da kaum Literatur, Richtlinien oder gar Labels zum Energieverbrauch von Prozesssteuerungen gefunden wurden, war es nötig, Messungen durchzuführen. Diese erfolgten einerseits in der Industrie an laufenden Anlagen, sowie an der Fachhochschule Chur. Sie wurden ergänzt durch Auswertungen von Firmenunterlagen (Kataloge) und Gesprächen mit Fachleuten aus der Praxis. Es hat sich gezeigt, dass die Leistungsaufnahme der einzelnen Prozesssteuerung relativ gering ist. Zudem fällt der gesamtschweizerische Verbrauchsanteil mit knapp 14 GWh kaum ins Gewicht. Schliesslich sind bei neueren Geräten Optimierungen bereits weitgehend realisiert.

ANTRIEBE / ELEKTRISCHE MOTOREN

Mit verschiedenen Bestrebungen beabsichtigt die EU, Motoren mit tieferen Wirkungsgraden vom Markt zu eliminieren. So hat sie mit dem *European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics (CEMEP)* vor einiger Zeit eine freiwillige Vereinbarung getroffen, die unter Anwendung von Effizienzklassen bei Motoren eine Steigerung der Verkaufszahlen von energieeffizienten Motoren (Typ eff1 und eff2) definiert und die Anzahl ineffizienter Motoren (Typ eff3) reduziert. Der Bund beabsichtigt, analog dazu unter Einbezug der schweizerischen Motorenhersteller und -verkäufer, die Verbreitung der energieeffizienten Motoren in der Schweiz zu fördern. Mit dem Projekt **Industrievereinbarung Energieeffizienz von Motoren** [2c] sollen diesbezüglich Grundlagen erarbeitet werden. Zur Umsetzung ist gemeinsam mit der Industrie eine *Working Group eff (WG-eff)* etabliert worden, welche die erforderlichen Voraussetzungen für den Abschluss einer freiwilligen Vereinbarung prüft und die Vereinbarung ausarbeitet. Ein erster Entwurf liegt vor.

Das Pilotprojekt zum europäischen **Motor Challenge Programm (MCP)** [12a] der EU-Kommis-

sion sollte sowohl fachliche Voraussetzungen für die spätere Programm-Durchführung schaffen, als auch die Phasen der Kontaktnahme mit Industriefirmen, sowie der ersten Energieanalysen erproben. Ziele des Programms sind insbesondere die Bewusstseinsbildung bei Industrie-Topmanagern zu Energiefragen bei Antrieben und deren Engagement in Effizienz-Aktivitäten im eigenen Unternehmen. In Zusammenarbeit mit der *Energieagentur der Wirtschaft (EnAW)* konnten in der Schweiz mehrere interessierte Firmen gefunden werden, wovon zwei sich zur Teilnahme entschlossen: ein Lebensmittelproduzent, sowie ein chemischer Grossbetrieb. Beide Firmen stellen einen Partnerschaftsantrag an die europäische Kommission. Insgesamt wurden im Projekt über 18 GWh/a Elektrizitätseinsparpotenzial mit einer durchschnittlichen Payback Zeit von 13 Monaten ermittelt, wozu die beiden Schweizer Unternehmen rund 3 GWh/a beitrugen.

Mit dem Projekt **OPAL-Erweiterung mit Lüfter- und Pumpensystemen** [13a] wurde die bestehende Auslege-Software *OPAL* erweitert. Damit kann die Energieeffizienz solcher Anlagen unter Einbezug von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen schnell und einfach beurteilt werden. Diese Module wurden im oben genannten *Motor Challenge Programm* ausgetestet. Unter Nutzung der sich ergebenden Synergien wird im neu gestarteten, internationalen *SAVE-Projekt Promot: Ein Werkzeug zur Entscheidungsfindung für Motorenbetreiber* [13b] ein umfassendes Werkzeug zur Umsetzung des Einsparpotentials von elektrischen Motoren entwickelt. Die Erfahrungen und Entwicklungen bei *OPAL* werden somit international optimal verbreitet.

Im Projekt **Hocheffiziente getriebelose Antriebe** [14] werden effiziente Antriebe für Anwendungen mit tiefen Drehzahlen entwickelt. Diese bestehen aus einem IGBT-Umrichter und einer hochpoligen, permanent erregten Synchronmaschine und können sowohl als Motor als auch als Generatorsystem verwendet werden. Sie werden für die Leistungsklassen 1,2 MW und 3 kW untersucht. Im Berichtsjahr wurden Umrichter und Maschine für das 1,2 MW System fertig gestellt und geprüft. Die vorausgerechneten Wirkungsgrade von ca. 95.8% für die Maschine und ca. 98% für den Umrichter – was einer Verlustreduktion um mehr als 50% entspricht – konnten messtechnisch bestätigt werden. Die hohe Effizienz wird erreicht, weil einerseits auf ein mechanisches Getriebe verzichtet werden kann und andererseits Maschine und Umrichter optimal aufeinander abgestimmt und verbessert wurden. Da die Auslegung der 3 kW Maschine erheblich mehr

Zeitaufwand als erwartet erforderte, erfolgt deren Prüfung erst 2004.

Das Projekt **Prototyp Energie-Spasmotor** [15] basiert auf einer neuartigen Technologie mit einem Permanentmagnet-Rotor. Nachdem eine Machbarkeitsstudie Erfolg versprechende Ergebnisse hervorbrachte, wird nun eine weitere Energieoptimierung durch Alternativen im Bereich Wicklungsverfahren und Stator konstruktion geprüft. Dazu sind im Berichtsjahr Magnetfluss-Simulationen durchgeführt worden.

Mit dem Projekt **Integraldrive II: Integrierter Motor-Umformer mit bedarfsorientierter Energieaufnahme** [16] soll ein Energie effizienter und kostengünstiger Asynchronmotor im Leistungsbereich 0,1 bis 12 kW mit integrierter Energiedrosselung für den Pumpen- und Lüfterbereich realisiert werden, der kosten- und volumenmässig alle im Markt bekannten Lösungen für drehzahlverstellbare Antriebe unterbietet. Im Berichtsjahr wurde der Leistungsteil (rotierende Elektronik) ausgelegt. Für die Speisung und Signalübertragung zum Leistungsteil wurde eine kostengünstige und zuverlässige Lösung entwickelt. Für die mechanische Ausführung und das Unterbringen der gesamten Umrichter-Baugruppe liegt eine kompakte und robuste Lösung vor. Ferner wurde ein Prüfstand aufgebaut (siehe Fig. 3).



Figur 3: Prüfstand des Integralmotors mit offenem Lüfterbereich (Quelle: IDS AG, Zürich)

In der Schweiz verbrauchen jährlich etwa 150'000 Druckluftanlagen rund 750 GWh Elektrizität, was 1,5% des nationalen Stromverbrauchs ausmacht. Davon könnten mit energieeffizienten Druckluftanlagen theoretisch 300 GWh und praktisch 100 GWh elektrische Energie pro Jahr eingespart werden. Mit dem Projekt **Druckluft**

Kompetenzcenter [17] wurde an der Fachhochschule Zentralschweiz eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, die den grundsätzlichen Nachweis erbrachte, dass einerseits der Markt ein derartiges neutrales Kompetenzcenter akzeptiert und andererseits auch die entsprechenden Kompetenzen und Infrastrukturen an der Fachhochschule aufgebaut werden können. Parallel hat die **Machbarkeitsstudie zur Übertragung der deutschen Energiesparkampagne «Druckluft effizient» in die Schweiz** [18] aufgezeigt, mit welchen Mitteln und in welcher Form die gleichnamige deutsche Kampagne in die Schweiz transferiert werden könnte.

GERÄTE / DIVERSES

Weil Minibars direkt im Hotelzimmer stehen, müssen sie geräuschlos sein. Deshalb werden ausschliesslich Absorbergeräte eingesetzt, welche aber technisch bedingt sehr viel Energie verbrauchen. Das Einspar-Potenzial ist beträchtlich: in der Schweiz verbrauchen nach vorläufigen Abschätzungen die ca. 50'000 Absorber-Minibars rund 22 GWh/a, nicht eingerechnet den Strom-Mehrverbrauch in klimatisierten Zimmern. Aus technischer Sicht könnte die Dienstleistung mit einem Viertel des aktuellen Stromverbrauchs erbracht werden. Im Projekt **Effiziente Hotel-Minibar** [12b] konnten verschiedene Alternativen vorerst grob beschrieben werden, welche den Geräte-Elektrizitätsverbrauch drastisch senken können. In einer weiteren Arbeitsphase werden direkte Kontakte mit Anbietern etabliert, um einen Partner für die Entwicklung eines alternativen Minibar-Systems zu finden.

In Banken, Büros und Warenhäusern trifft man immer häufiger Wasserspender an. Diese Geräte bestehen aus einem Standgehäuse mit eingebautem Kühlaggregat und einem aufgesetzten Wasserbehälter. Am Auslasshahn kann das Wasser gekühlt und teilweise auch heiss bezogen werden. Mit dem Projekt **Energieeffizienzpotential bei Wasserdispensern** [10c] wurden erste Grundlagen über diese im Wachstum stehende Gerätekategorie gewonnen. Der heutige Landesverbrauch beträgt etwa 4,5 GWh. Die Zuwachsrate beim Gerätebestand ist hoch, bis ins Jahr 2010 könnte der Verbrauch bis auf 42 GWh ansteigen. Gemäss Untersuchungen liegt das technische Einsparpotential bei etwa 50% und setzt sich zu etwa gleichen Teilen aus den Massnahmen: Verbesserung der Geräteeffizienz, Verzicht auf Heisswasser und Abschalten nachts und an Wochenenden zusammen.

In der Schweiz waren Ende der 90er Jahre etwa 16'000 gekühlte Getränke- und Warenautoma-

ten 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** [10d] Tipps zum Unterhalt und zum Aufstellungsort zusammengestellt. Als Zielpublikum vorgesehen sind die Betreiber von Automaten und die Vermieter der Standplätze. Das Merkblatt ist im Berichtsjahr nach einer Branchen-Vernehmlassung fertig gestellt worden.

Mit dem Projekt **Energieeffizienzpotential bei Heissgetränkeautomaten in der Betriebsverpflegung** [19] wurde der landesweite Energieverbrauch entsprechender Automaten auf etwa 43 GWh/Jahr geschätzt. Davon ausgenommen sind die Haushaltskaffeemaschinen, die in einem separaten Projekt untersucht wurden. Das technische Einsparpotential liegt bei etwa 80%, also in der Grössenordnung von 34 GWh. Zwar bestehen verschiedene Hemmnisse für eine vollständige Umsetzung. Dennoch könnten mit Aktivitäten des Bundes und der Branche ein Teil davon umgesetzt werden. Möglichkeiten bestehen in der Implementierung einer Ausschaltautomatik bei Geräten in der Bundesverwaltung sowie bei freiwilligen Vereinbarungen.

Der Elektrizitätsverbrauch von Haushaltsgeräten ist für die klassischen Betriebszyklen recht gut bekannt, hingegen bestanden zum Standby-Zustand noch wesentliche Wissenslücken. Im Projekt **Standby-Verbrauch von Haushaltsgeräten** [12c] wurden mit Marktbefragungen, Messungen

und Analysen neue Kenntnisse hinzu gewonnen. Die Standby-Verluste der Haushaltsgeräte in der Schweiz summieren sich gesamthaft auf rund 400 GWh. Der grösste Anteil – rund 80% – ist der Warmhaltung von Kaffeemaschinen anzulasten. Bei einigen Gerätekategorien ist der Anteil des Standby-Verbrauchs am gesamten Elektrizitätsverbrauch der Geräte extrem hoch. Technische Ansatzpunkte zur Effizienzsteigerung sind bei den Kaffeemaschinen insbesondere Auto-off-Funktionen und bessere Wärmedämmung der Boiler. Bei den Induktionskochfeldern lassen sich die überraschend hohen Verluste für die Steuerungen massiv reduzieren. Die entscheidende Voraussetzung für alle Massnahmen zur Effizienzsteigerung sind praxiserhaltende Richtlinien und Messnormen zur Deklaration der Standby-Verluste.

Mit dem europäischen Programm *GreenLight* soll die Energieeffizienz von Beleuchtungsanlagen in Gebäuden verbessert werden. Da die Schweiz an diesem Programm teilzunehmen gedenkt, erfolgten im Projekt **GreenLight-Aufbau eines National Contact Points in der Schweiz** [20] die entsprechenden Aufbauarbeiten. Durch allgemeine Promotionsaktivitäten wie Publikationen in Zeitschriften, eine eigene Website und Präsentationen an Veranstaltungen wurde das Programm einer breiteren Öffentlichkeit vorgestellt. Durch eine Vielzahl von Kontakten konnte mit der *IBAarau Elektro AG* ein erster Endorser und mit der Stadt Zürich ein erster Partner gewonnen werden. Es ist beabsichtigt, nach den erfolgreichen Aufbauarbeiten die Aktivitäten durch die *Energieagentur S.A.F.E.* fortzusetzen.

Nationale Zusammenarbeit

In allen Programm-Schwerpunkten haben im Rahmen der etablierten **Trendwatching-Gruppen**, die sich jeweils aus Vertretern der einschlägigen Industrie, Hochschule und anderer Forschungsstätten zusammensetzen, je eine bis zwei Sitzungen stattgefunden. Diese anerkannten Zusammenkünfte von Fachleuten bewährt sich als regelmässig stattfindendes, nationales Informations- und Diskussionsforum. Neu konnte im Berichtsjahr auch im spezifischen Bereich USV eine Trendwatching-Gruppe etabliert werden.

An der Fachhochschule Biel entwickelte sich u.a. auch aufgrund des Projekts *Zunahme der dezentralen Energieerzeugungsanlagen in Verteilnetzen* ein eigentliches **Kompetenzcenter zum Thema Verteilnetz**. Zudem wurden die Grundlagen geschaffen, dass die Hochschule für Technik und Ar-

chitektur Luzern ein *Druckluft-Kompetenzcenter* aufbauen kann. Generell wurde die Einbindung von **Fachhochschulen** angestrebt, und mehreren Projekten auch erreicht. Das etablierte **Kompetenzzentrum Energie- und Informationstechnik** an der ETH Zürich schliesslich 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*, dem *Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL)*, der *Commission Recherche, développement, prospective de la Chambre romande d'énergie électrique (RDP /*

CREE) und der *KTI* gepflegt werden. Speziell mit der *KTI* konnte in zwei grossen Projekten eine Ko-finanzierung erzielt werden.

In mehreren Projekten wird ein enger Kontakt zu den schweizerischen **Energieagenturen** [32] gepflegt. So laufen gemeinsame Aktionen mit der *Energieagentur der Wirtschaft (EnaW)*, der *Energieagentur Elektrogeräte (eae)* und ebenso mit der *Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz*

(*S.A.F.E.*). In praktisch allen Projekten wird zudem angestrebt, die einschlägigen **Branchenverbände** einzubinden.

In der gemeinsam mit den *ETG (Elektrotechnische Gesellschaft)* und *ITG (Informationstechnische Gesellschaft)* organisierten Tagung **Ohne Energie keine Informatik** im Frühling 2003 konnten mehrere BFE-Forschungsprojekte einer breiten Zuhörerschaft präsentiert werden.

Internationale Zusammenarbeit

In allen Schwerpunktsbereichen bestehen gute internationale Kontakte. Diese werden sowohl bei der direkten Zusammenarbeit in Projekten als auch bei internationalen Konferenzen und Workshops gepflegt.

Neben der schweizerischen Teilnahme am IEA-Programm **Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector** nehmen im Rahmen des 5. *EU-Rahmenprogramms* zwei schweizerische Gruppen mit dem Projekt **BIG POWA** (GRD1-1999-10461) am Programm **Growth** teil und bearbeiten das Problem der AC-Verluste für einen Transformator und eine Modellspule. Ferner nimmt die Schweiz mit 2 Gruppen und als Mitglied des Steering Committee am europäischen Programm des über 80 Gruppen umfassenden **Superconducting European Network, SCENET II** (GTC1-2001-43047) teil, welches im Juli 2002 begonnen hat und 4 Jahre dauern wird. *SCENET II* will den Informationsfluss innerhalb Europas optimieren und damit die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Forschung verbessern. Aufgrund dieser internationalen Einbettung ergeben sich viele Kontakte zu Forschungsinstituten, was unter anderem eine Voraussetzung war, dass mehrere Schweizer Institute bei den Vorarbeiten zum 6. EU-Rahmenprogramm zum Thema *HTSL* teilnehmen konnten.

Beim Thema der *dezentralen Energieerzeugungsanlagen* wurde ein Informationsaustausch mit der auf diesem Gebiet aktiven **Universität Dortmund** etabliert (Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung). Das Projekt **Einsatz von Druckluftspeichersystemen** erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem europäischen *INVESTIRE*-Projekt (ENK5-CT-2000-20336).

Die schweizerischen Arbeiten im Gebiet der **Informations- und Kommunikationstechnik**

sind international abgestützt und koordiniert. So werden neben anderem Kontakte mit der europäischen Kommission, der *EPA (Environmental Protection Agency)* und dem *LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)* in den USA sowie mit der französischen *ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)* gepflegt.

An der **3rd international Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting (EEDAL'03)** [33] im Herbst 2003 in Turin wurden einerseits mehrere nationale Projekte präsentiert und andererseits konnten bestehende Kontakte gefestigt und neue etabliert werden.

Im Rahmen der **Ergänzenden Unterstützungsaktivitäten zum Motor Challenge Programm (MCP) in der Schweiz** konnte die Mitunterstützung des europäischen und deutschen Kupferinstitutes sichergestellt werden. Ferner wurde mit der Beauftragung des deutschen Fraunhofer Institutes zur Prüfung der Übertragung der Kampagne *Druckluft effizient* in die Schweiz die internationale Kooperation auf dem Gebiet der Effizienzsteigerung im motorischen Bereich weiter vertieft. Zudem ist die Schweiz aktiver Partner im europäischen **SAVE-Projekt Promot: Ein Werkzeug zur Entscheidungsfindung von Motorenbetreibern**. Erfreulich war, dass der BFE-Programmleiter im Berichtsjahr zu einer internationalen Motoren-Tagung eines namhaften, europäischen Motorenherstellers als Referent eingeladen wurde.

Schliesslich wird durch die Schweizer Teilnahme am **Greenlight-Programm** und am **Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy sectors using Hydrogen** der Anschluss an die internationale Forschergemeinde sichergestellt.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

ELEKTRIZITÄTSSTRANSPORT UND -SPEICHERUNG

Das internationale Projekt **Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy sectors using Hydrogen (RES: Reversible Energy Storage System)** [21] hat zum Ziel, im Rahmen eines Pilotprojektes auf Gran Canaria das Zusammenspiel von erneuerbaren Energien in autonomen Netzen zu prüfen und aufgrund einer dezentralen Stromerzeugung eine Wasserstoff-Speicherung auszutesten. Die Design-Phase ist weitgehend abgeschlossen.

Unter der Prämisse, dass zukünftig vermehrt dezentrale Erzeugungsanlagen elektrische Energie produzieren, ist die Kenntnis über das Zusammenwirken einer Vielzahl von kleineren Einheiten zwingend notwendig. Die Hauptzielsetzung der Machbarkeitsstudie **Dezentrale Erzeugungsanlagen in Niederspannungsnetzen** [22a] ist die Festlegung der Rahmenbedingungen für die Realisierung eines Projektes zur Installation eines realen Pilot- und Demonstrationsnetzes im 400 V Niederspannungsnetz. Die bisherigen Kontakte mit Verbänden, Energieversorgungsunternehmen und Herstellern/Vertreibern von dezentralen Energieerzeugungsanlagen lassen auf ein reges Interesse am Projekt schliessen. Im Laufe des Jahres 2004 sind die Pilotanlagen zu definieren und die Finanzierung des Betriebs, sowie des entsprechenden Umfeldes zu klären.

ENERGIE UND INFORMATIONSTECHNIK

Im Projekt **Ausschreibungsunterlagen im Server-, PC- und Netzwerkbereich** [23a] stehen aussagekräftige Mustertexte zur Verfügung, die bei Ausschreibungen der öffentlichen Hand und bei privaten Grosseinkäufem beigezogen werden können, um einen Marktdruck hin zu energieeffizienteren Geräten im Server-, PC- und Netzwerkbereich zu erzeugen. Diese werden nun bundesintern auf deren Wirkung hin geprüft.

Verschiedene BFE-Projekte haben neue und umsetzungsreife Erkenntnisse gebracht, die nun in einer eigentlichen Merkblatt-Serie im Rahmen des Projekts **Merkblätter im IT-Bereich** [23b] erstellt werden. Dabei werden die Bereiche IT-Beschaffung, Server schalten und Energieverwaltung in **Windows®** thematisiert. Die zwei Merkblätter **IT-Beschaffung** und **Energieverwaltung in Windows®** sind fertiggestellt worden. Das Merkblatt **Server schalten** ist in der Vernehmlassung.

Untersuchungen zeigen, dass der Stromverbrauchsanteil für die Kühlung von IT-Räumen von heute ca. 50% auf unter ca. 30% für bestehende und auf unter ca. 20% des Gesamtstromverbrauchs für neue IT-Räume gesenkt werden könnte. Mit dem Projekt **Energieeffizientes Kühlen von IT-Räumen** [24a] sollen in einer Informationsdokumentation den HLK-Planern und den IT-Betreibern die relevanten Parameter und Zusammenhänge für eine energetisch effiziente Kühlung von IT-Räumen aufgezeigt werden. Ein Entwurf der Planungs- und Informationsdokumentation wurde verfasst. Zur Kontrolle der energetischen Effizienz (Verhältnis Gesamtstromverbrauch zu Stromverbrauch der Kühlung) werden in einem IT-Raum Stromverbrauchsmessungen verglichen.

Eine 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 Jahre erarbeitetes **Merkblatt des BFE 26 Grad in EDV-Räumen, eine Raumtemperatur ohne Risiko** [24b] wird aktualisiert und überarbeitet.

ANTRIEBE / ELEKTRISCHE MOTOREN

Um nach dem Abschluss des EU-Pilotprojekts bezüglich dem **Motor Challenge** Programm (MCP) die Kontinuität sicherzustellen, wurden **Ergänzende Unterstützungsaktivitäten zum MCP in der Schweiz** [25a] initiiert. Damit sollen in der Schweiz weiterhin Industriebetriebe zur Teilnahme an Motor Challenge bewegt werden. Ergänzend sollen die Motorenbetreiber (als Partner), aber auch die Planer, Zulieferer und Hersteller (als Endorser) über die Einsparpotenziale sowie die Massnahmen zu deren Erschliessung informiert und zum Handeln motiviert werden. Im Jahr 2003 wurde ein Informations- und Kommunikationskonzept erstellt, sowie Vorbereitungen für die Messungen und Analysen im integrierenden Pilotprojekt an zwei Gebäuden der **Novartis Pharma AG** in Basel getroffen.

Mit dem Projekt **Elektrizitätseffizienz in Kehrichtverwertungsanlagen** [22b] wurden alle energierelevanten Prozesse und Verfahrenstechniken in Kehrichtverwertungsanlagen auf Optimierungspotenziale analysiert (siehe Fig. 4). Für die vertiefte Analyse einzelner Prozesse wurden Messreihen durchgeführt. Bei der KVA Turgi kann jährlich zwischen 1,8 GWh bis 2,3 GWh elektri-



Figur 4: Kühlwasserfassung der KVA Turgi
(Quelle: Schnyder Ingenieure AG, Hünenberg)

sche Energie 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 Kehrriechungsverwertungsanlagen der Schweiz ergab ein Einsparpotenzial von jährlich ca. 40 GWh, was dem Verbrauch von rund 11'000 Haushalten entspricht.

Im Projekt **Energieeffizienz in Abwasserreinigungsanlagen (ARA)** [26] wurden mit einem neuartigen Leitsystem, ohne Eingriffe in die bestehenden Prozesse, Messungen in einer schweizerischen ARA durchgeführt. Die Messungen zeigen das mutmassliche Einsparpotential auf. Mit der Ausdehnung der Messungen auf weitere ARA sollen die Erkenntnisse vertieft werden.

Bei mehreren Industriebranchen wurden gemäss der gesetzten Ziele branchenspezifische Pilotprojekte unter Einbezug entsprechender Betriebe lanciert. Die Projekte **Einsparung von elektrischer Energie in einem Sägereibetrieb** [27] und **Energieeinsparung am Fallbeispiel Christoph Burckhardt AG** [28] haben je ein substantielles Effizienzsteigerungspotential an den Tag

gebracht. Da sich ein Grossteil als wirtschaftlich erwies, werden diese nun sukzessive umgesetzt.

GERÄTE / DIVERSES

In der Schweiz existieren nach der Einführung des neuen Zivilschutzkonzepts rund 3000 unterirdische Anlagen. Damit minimale Anforderungen an das Raumklima erfüllt werden, müssen die Anlagen mit frischer Luft versorgt und entfeuchtet werden. Im Projekt **Effizientes Entfeuchten von abgeschlossenen Räumen** [29] hofft man nachweisen zu können, dass durch optimale Ausnützung der Differenzen von Temperatur und Luftfeuchtigkeit zwischen innen und aussen die mechanische Entfeuchtung reduziert, ja zeitweise sogar ganz darauf verzichtet werden kann. Der Energieaufwand zur reinen Entfeuchtung pro Anlage liegt bei 10'000 kWh/a. Dieser könnte durch optimales Lüften um mindestens 20% bis 30% reduziert werden, was ein mutmassliches Einsparpotential von gegen 10 GWh/Jahr ergibt.

Das Ziel des Projektes **Energieoptimierte Textillufttechnikanlagen** [30] liegt darin, bei Textillufttechnikanlagen (TLT) die Befeuchtung vom Luftwechsel zu entkoppeln. Damit sollte sich der erforderliche Luftwechsel bei etwa 30% aller TLT-Anlagen um ca. 50 % senken lassen. Dazu sind die verschiedenen Befeuchtungssysteme vertieft analysiert worden. Im Verlauf der Analyse wurde bald klar, dass eine fundierte Beurteilung der Systeme nur mit einem umfassenden Versuchsaufbau zu machen ist. Dieser wird im kommenden Jahr durchgeführt.

Elektrische Heizbänder sind gewichtige Stromverbraucher: in der Schweiz wird ein jährlicher Verbrauch von ca. 300 GWh vermutet, was in etwa dem Verbrauch aller Fernsehgeräte entspricht. Mit dem Projekt **Elektrische Heizbänder – Merkblatt für den effizienten Einsatz** [25b] wurden die vorhandenen Erkenntnisse in einem praktisch anwendbaren Merkblatt umgesetzt.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Das gesetzte Ziel, die Ausrichtung des Programms für die Periode 04 – 07 in einem kohärenten **Konzept** auszuarbeiten, konnte unter Einbezug der verschiedenen Begleitgruppen erreicht werden. Auch die Erneuerung der Homepage [34] konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

Da sich das BFE nach der Ablehnung des EMG rasch in Richtung einer neuen Elektrizitätswirt-

schaftsordnung (ELWO) bewegte, verloren die ursprünglich vorgesehenen Arbeiten im Rahmen der Forschungsinitiative ihre akute Bedeutung, weshalb diese Aktivitäten vorerst nicht weiter verfolgt wurden. Erfreulicherweise konnte aber die seit langem angestrebte Ausbildungsvereinbarung mit dem VSE beidseitig unterzeichnet werden. Die Arbeiten im Bereich der dezentralen Energieerzeugungsanlagen werden im Bereich

Elektrizitätstransport und -speicherung unverändert den Schwerpunkt bilden und es wird angestrebt, dass der vorgesehene Feldversuch gemeinsam mit der Branche in einem ausgewählten Netz realisiert werden kann.

Die Studie des Strombegrenzers mit **Hochtemperatursupraleitungs-Material** wurde erfolgreich abgeschlossen und es ist zu hoffen, dass die Industrie mit ihren Aktivitäten fortfährt. Zudem wird versucht, weitere Industrien zu entsprechenden Projekten im HTSL-Gebiet zu motivieren. Die Wissensvermittlung innerhalb der Schweiz funktionierte gut und soll auch zukünftig aufrecht erhalten werden.

Die angepeilten Aktivitäten im Bereich der **Informations- und Kommunikationstechnik**, sowie im Bereich der vernetzten **Haushaltsgeräte** konnten weitgehend umgesetzt werden. Erfreulich ist, dass die in einem früheren Projekt erworbenen Erkenntnisse bezüglich IT-Ausbildung im Energiebereich nun durch Dritte umgesetzt werden. Zudem wurden mit den Aktivitäten bei

USV-Anlagen und beim Server-Schalten weitere Grundlagen geschaffen, die international Beachtung erhalten. Im Jahr 2004 sind die internationalen Kooperationen weiter zu intensivieren. Zudem sind weitere Grundlagen im Bereich Set-Top-Boxen zu erarbeiten und die energetischen Erkenntnisse bezüglich Kaffeemaschinen umzusetzen.

Im Bereich **Antriebe / elektrische Motoren** wurden in mehreren Branchen Demonstrationsprojekte beendet. Erfreulicherweise konnten endlich die Grundlagen für ein *Kompetenzzentrum Druckluft* geschaffen werden. Zudem konnte gezeigt werden, dass das in Deutschland laufende Programm *Druckluft effizient* auch in der Schweiz aktiviert werden könnte. Im Jahr 2004 müssen diese Erkenntnisse weiter umgesetzt werden. Da sich, wie erwartet, die europäische Einführung des *Motor Challenge* Programms verzögerte, konnte mit einem eigenständigen Projekt die Kontinuität in der Schweiz sichergestellt werden. Schliesslich sind im Jahr 2004 weitere branchenorientierte Demonstrationsprojekte zu initiieren.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2003 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden

- [1] C. Yechouroun, (cyrus.yechouroun@eivd.ch), HES-SO, Yverdon: **Démonstrateur pour réseau avec transport d'énergie en courant continue** (SB)
- [2] G. Schnyder, (gilbert.schnyder@sing.ch), SCHNYDER INGENIEURE AG, Hünenberg: **a) Zunahme der dezentralen Energieerzeugungsanlagen in Verteilnetzen** (SB) • **b) Energieeffizienz von USV-Anlagen** (JB) • **c) Industrievereinbarung Energieeffizienz von Motoren** (JB)
- [3] I. Cyphelly (cyphelly@ran.es), CYPHELLY & CO., Les Brenets: **Einsatz von Druckluftspeichersystemen** (JB)
- [4] F. Stalder, M. Büchler, R. Bräunlich, (sgk@sgk.ch), SCHWEIZ. GESELLSCHAFT FÜR KORROSIONSSCHUTZ (SGK), Zürich: **Wechselstromkorrosion an Pipelines**
- [5] 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)
- [6] M. Lakner, D. Braun (martin.lakner@ch.abb.com), ABB FORSCHUNGSZENTRUM, Baden-Dättwil: **Marktpotential von supraleitenden Strombegrenzern** (SB)
- [7] B. Aebischer, (bernard.aebischer@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, ETH-Zürich: **Betreuung des Kompetenzzentrums Energie und Informationstechnik** (JB)
- [8] B. Sauter, (beat.sauter@emt.ch), ENERGY MANAGEMENT TEAM AG, Ermatingen: **a) Energieeffizientes Servermanagement** (SB) ENET 230186 • **b) Energieeffizientes Servermanagement im praktischen Betrieb** (JB)
- [9] M. Held, (marcel.held@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Auswirkungen von periodischem Ein- und Ausschalten auf die Server-Hardware-Zuverlässigkeit** (SB)

- [10] A. Huser, (alois.huser@encontrol.ch), ENCONTROL GMBH, Niederrohrdorf: **a) Energieoptimaler Einsatz der ACPI-Funktionalität** (JB) • **b) Grundlagen zur Energieeffizienz von Set-Top-Boxen** (JB) • **c) Energieeffizienzpotential bei Wasserdispensern** (SB) ENET 230060 • **d) Merkblatt zur optimalen Energienutzung bei Kaltgetränke- und gekühlten Warenautomaten** (JB)
- [11] E. Bush, (bush@spin.ch), BUSH ENERGIE GMBH, Felsberg: **Energieverbrauch von Prozesssteuerungen** (SB) ENET 230096
- [12] J. Nipkow, (juergnipkow@swissonline.ch), ARENA ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIE-ALTERNATIVEN, Zürich: **a) Schweizer Vertretung im SAVE-Programm: Pilot Actions for the Motor Challenge Programme** (SB) www.motorchallenge.ch ENET 230187 • **b) Effiziente Hotel-Minibar** (JB) • **c) Standby-Verbrauch von Haushaltsgeräten** (SB) ENET 230107
- [13] R. Tanner, (tanner@semafor.ch), SEMAFOR INFORMATIK & ENERGIE AG, Basel: **a) OPAL-Erweiterung mit Lüfter- und Pumpensystemen** (SB) • **b) Promot: Ein Werkzeug zur Entscheidungsfindung für Motorenbetreiber** (JB)
- [14] R. Niederer, (niederer@technocon.ch), KONSORTIUM TECHNOCON / BARTHOLDI, Zürich: **Hocheffiziente getriebelose Antriebe** (JB)
- [15] J. Weingartner, (j.weingartner@baechli.com), BÄCHLI AG, Kriens: **Prototyp Energie-Sparmotor** (JB)
- [16] A. Stoev, A. Dittrich (a.stoev@idsag.ch), IDS AG, Zürich: **Integraldrive II: Integrierter Motor-Umformer mit bedarfsorientierter Energieaufnahme** (JB)
- [17] S. Eigen, (seigen@hta.fhz.ch), HTA LUZERN, INSTITUT FÜR ELEKTRONIK, Horw: **Druckluft Kompetenzcenter** (SB)
- [18] P. Radgen, (peter.radgen@isi.fhg.de), FRAUNHOFER INSTITUT , SYSTEMTECHNIK UND INNOVATIONSFORSCHUNG, Karlsruhe: **Machbarkeitsstudie zur Übertragung der deutschen Energiesparkkampagne „Druckluft effizient“ in die Schweiz** (SB) ENET 230188
- [19] A. Huser, R. Schmitz (alois.huser@encontrol.ch / rolf.schmitz@electrosuisse.ch), KONSORTIUM ENCONTROL/ELECTROSUISSE, Niederrohrdorf: **Energieeffizienzpotential bei Heissgetränkeautomaten in der Betriebsverpflegung** (SB)
- [20] P. Schneiter, (paul.schneiter@energieeffizienz.ch), SCHWEIZ. AGENTUR FÜR ENERGIEEFFIZIENZ, Zürich: **GreenLight NCP – Aufbau eines National Contact Points in der Schweiz** (SB)

Liste der P+D-Projekte

- [21] A. Stoev, (a.stoev@idsag.ch), IDS AG, Zürich: **Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy sectors using Hydrogen** (JB)
- [22] G. Schnyder, (gilbert.schnyder@sing.ch), SCHNYDER INGENIEURE AG, Hünenberg: **a) Dezentrale Erzeugungsanlagen in Niederspannungsnetzen** (JB) • **b) Elektrizitätseffizienz in Kehrichtverwertungsanlagen** (JB)
- [23] A. Huser, (alois.huser@encontrol.ch), ENCONTROL GMBH, Niederrohrdorf: **a) Ausschreibungsunterlagen im Server-, PC- und Netzwerkbereich** (SB) ENET 230105 • **b) Merkblätter im IT-Bereich** (JB)
- [24] A. Altenburger, (adrian.altenburger@amstein-walthert.ch), AMSTEIN + WALTHERT AG, Zürich: **a) Energieeffizientes Kühlen von IT-Räumen** (JB) • **b) Aktualisierung des BFE-Merkblatts „26 Grad in EDV-Räumen, eine Raumtemperatur ohne Risiko“**
- [25] J. Nipkow, (juergnipkow@swissonline.ch), ARENA ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIE-ALTERNATIVEN, Zürich: **a) Ergänzende Unterstützungsaktivitäten zum Motor Challenge Programme in der Schweiz** (JB) www.motorchallenge.ch • **b) Elektrische Heizbänder – Merkblatt für den effizienten Einsatz** (SB) ENET 230082

- [26] R. Büniger, (buenger1@bluewin.ch), BÜNGER CONSULTING, Grenchen: **Energieeffizienz in Abwasserreinigungsanlagen (ARA)** (JB)
- [27] I. Wyrsh, (iso.wyrsh@wyrstech.ch), WYRSCH TECHNOLOGIE, Küssnacht a. Rigi: **Einsparung von elektrischer Energie in einem Sägereibetrieb** (SB)
- [28] R. Tanner, (tanner@semafor.ch), SEMAFOR INFORMATIK & ENERGIE AG, Basel: **Energieeinsparung am Fallbeispiel Christoph Burckhardt AG** (JB)
- [29] A. Weitnauer, (adrian.weitnauer@weitnauer-messtechnik.ch), WEITNAUER MESSTECHNIK, Näfels: **Effizientes Entfeuchten von abgeschlossenen Räumen** (JB)
- [30] U. Kupferschmid, (uku@luwa.ch), LUWA TEXTILLUFTTECHNIK, Uster: **Energieoptimierte Textillufttechnikanlage** (JB)

Referenzen

- [31] **Homepage von EnergieSchweiz und dem BFE** www.energie-schweiz.ch
- [32] **Homepage von Energieagenturen** www.energieagentur.ch und www.energie-agentur.ch und www.eae-geraete.ch
- [33] R. Brüniger: **Reisebericht: 3rd international Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting (EEDAL'03)**, www.electricity-research.ch.
- [34] **Internetseite des Forschungsprogramms** www.electricity-research.ch. Download von Zusammenfassungen und Schlussberichte durchgeführter Forschungsarbeiten
- [35] **Internetseite des Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL)** (dort sind auch Links zu nationalen Forschungsstätten zu finden) www.psel.ch
- [36] Internetseite des National Center of Competence in Research (NCCR): **Materials with Novel Electronic Properties MaNEP**: <http://www.manep.ch/manep/manep.html>
- [37] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007**, www.energie-schweiz.ch/internet/03095/index.html?lang=de

UMGEBUNGSWÄRME, WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG, KÄLTE

Überblicksbericht zu Forschungsprogramm 2003

Thomas Kopp (F+E), Max Ehrbar (P+D)

tkopp@hsr.ch

max.ehrbar@ntb.ch



P+D-Analge Sportzentrums Bettmeralp (VS)

Die Anlage wurde mit Wärmepumpen (kleines Bild) saniert, welche Wärme und Kälte kombiniert erzeugen und Restaurant, Fitnessräume, Sauna, Schwimmbad und Tennishalle versorgen.

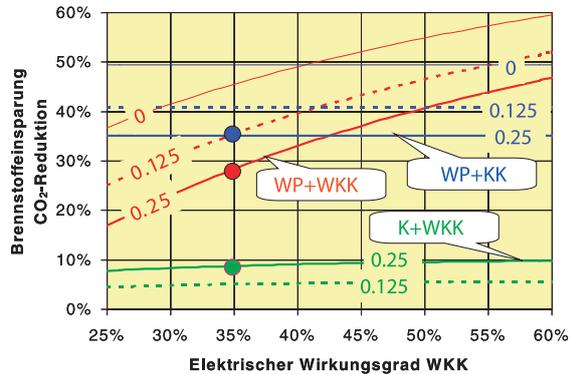
Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

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 % aus fossilen Brennstoffen erzeugt. Dabei werden Kohlendioxid und Schadstoffe produziert. Im Bestreben, diese Emissionen zu senken, ist die saubere Verbrennung von flüssigen und gasförmigen Brennstoffen zu verbessern und eine substantielle Substitution mit Wärmepumpen anzustreben.

Elektrisch angetriebene Wärmepumpen können den fossilen Brennstoffverbrauch und damit auch den Kohlendioxid-Ausstoss signifikant vermindern, sofern die elektrische Energie CO₂-neutral erzeugt wird (z.B. mit Wasserkraft oder Kernenergie). 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 erzielen. 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** [31]. Damit wird natürlich auch die **CO₂-Produktion entsprechend reduziert**. Wärmepumpen sind für eine effiziente Nutzung der Brennstoffenergie unerlässlich. 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:

- Kessel und Kombikraftwerk (K+KK)
- Kessel und WKK-Anlage (K+WKK)
- Wärmepumpe und WKK-Anlage (WP+WKK)
- Wärmepumpe und Kombikraftwerk (WP+KK)

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 Wir-



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 [31]

kungsgrad 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 2003 wurden folgende Ziele verfolgt:

- Verbesserung der **Integration von Wärmepumpen in Gesamtsysteme** durch verbesserte Regelstrategien und vereinfachte Einbindungs-Schaltungen
- 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
- Erhöhung der **Marktakzeptanz von WKK-Anlagen**

Die in früheren Jahren in diesem Programm bearbeiteten Problemstellungen im Bereich **Abwärme** und verfahrenstechnische Prozesse wurden Anfangs 2003 zum BFE-Programmleiter Herrn Martin Stettler transferiert.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

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 [32]. 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 Quelltemperatur 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

Wärmepumpen werden zur Raumheizung und zur Warmwasserbereitung in Gebäuden eingesetzt. Dabei spielen die Wärmeverteilung im Gebäude und die Einbindung der Wärmepumpe in dieses System eine wichtige Rolle. Im Jahr 2002 konnte die für die Praxis wichtige Arbeit der Optimierung von **Standardschaltungen** [1] abgeschlossen und 7 gängige Schaltungen konnten in optimierter Form aufgezeigt 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 wird diese Variante daher ausgemessen und beurteilt. Der dabei anfallende Datensatz wird für den allgemeinen Gebrauch als Vergleichs- oder Prüfdatensatz aufgearbeitet. Auch die beim Projektleiter schon vorhandenen Datensätze aus für die Standardschaltungen typischen Messperioden werden in einer übersichtlichen Form aufgearbeitet. Damit werden erstmals Datensätze für verschiedene Situationen

von Wärmepumpen-Einbindungen in Gebäuden öffentlich zugänglich zur Verfügung stehen.

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. Die seit einigen Jahren laufenden Forschungsaktivitäten zur **Pulsbreitenmodulation** (Einbringen von Wärmepaketten in günstigen Zeitabschnitten) [3] konnte im Berichtsjahr abgeschlossen werden. Aus den bisherigen Phasen 1 und 2 wurde klar ersichtlich, dass die Pulsbreitenmodulation gut und energieeffizient funktioniert. Die in der nun abgeschlossenen **Projektphase 3** [4] erwartete Bewertung der grundsätzlichen 3 Regelungsstrategien nach der eingebrachten Energie, der Wärmepumpen-Laufzeit und nach einem auf das Gebäude adaptierten speziellen Modell erbrachte keinen eindeutigen Bestfall. Alle Strategien wurden aber erfolgreich in einen industriellen Regler eingebaut und an einem Einfamilien-Haus mit Bodenheizungs- und Radiatorenheizungssektor während einer Heizsaison erprobt. Das Projekt hat klar gezeigt, dass die Strategie der Pulsbreitenmodulation für den Benutzer in finanzieller Hinsicht und beim Komfort Vorteile aufweist.

Der Betrieb von Wärmepumpen erzeugt gewisse Schwingungen, die zu unerwünschten Lärmemissionen führen können. Der dabei erzeugte Frequenzgang und die Intensität der Schwingungen können entscheidend sein. Damit wird die Akzeptanz der Wärmepumpen in der Bevölkerung vermindert. In der Arbeit **Beurteilung der Tonhaltigkeit von Wärmepumpen** [5] wurden diese Aspekte untersucht. Die Erkenntnisse wurden zusammen mit den Resultaten der im Jahre 2002 abgeschlossenen Forschungsarbeit **Lärmredukti-**

on bei **Luft/Wasserwärmepumpenanlagen** [6] im Lärmschutz-Handbuch **Schallschutz bei der Aufstellung von Wärmepumpen** [7] zusammengefasst, das in der Praxis sicherlich Eingang finden und Lärmklagen über Luft/Wasserwärmepumpen verhindern wird.

Leistungsermittlungsmethoden

Im Markt werden die einzelnen Wärmepumpen als Marktprodukte verglichen und bewertet. Meistens wird dabei 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 die dadurch 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 heute viel verbreitete Methode der EN255 kann hier nicht genügen. Schon seit einigen Jahren wird deshalb im Programm die Methodik der Leistungsermittlung theoretisch und praktisch erfasst und verbessert. Im Jahr 2003 konnten die beiden **Projekte Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpenanlagen zur kombinierten Raumheizung und Warmwasserbereitung** [8] und **Wärmepumpentest für die kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung** [9] abgeschlossen werden. Der theoretische Teil bewertet die gängigen Methoden zur Ermittlung des Jahresnutzungsgrades und schlägt eine verbesserte Methode (FHBB_Methode) vor. Im praktischen Teil werden 2 Systeme der Integration der Warmwasserbereitung verglichen, wobei zwischen dem System *gleichzeitige Warmwasser-Produktion* und dem System *Alternative, zeitlich zur Heizungswärme-Erzeugung versetzte Warmwasser-Produktion* kein grosser Unterschied festgestellt wurde. Es zeigt sich auch, dass zur Bewertung der verschiedenen Warmwasser-Temperaturen ein Gütegrad eingeführt werden sollte. Hingegen haben die Speicherverluste und die Leistungen der Umwälzpumpen einen sehr grossen Einfluss auf den Jahresnutzungsgrad. Dies zeigt wiederum klar auf, dass der alleinige Vergleich der Wärmepumpen untereinander, der sich nur auf den COP bezieht, unseriös ist. Es wird aber auch aufgezeigt, dass noch ein erhebliches Verbesserungspotential bei der Art und Weise der Einbindung der Wärmepumpen in das Gebäude

besteht. Die Erfahrungen der bisherigen Arbeiten dienen nun in einem neu gestarteten Projekt an der FH Muttenz dazu, den **Jahresnutzungsgrad von Kompaktgeräten** [10] zu berechnen und die Ergebnisse mit konkreten Messungen zu vergleichen.

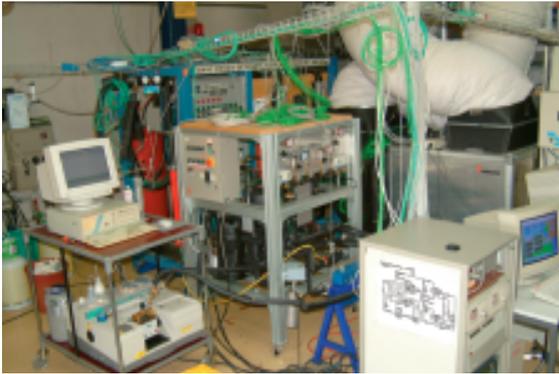
Die Grundproblematik der Bewertung der Leistungen von Wärmepumpen zeigt sich auch im internationalen Umfeld. Der frühere Programmleiter Martin Zogg hat deshalb erfolgreich im Rahmen des *Heat Pump Program* der IEA ein Projekt zur Untersuchung dieser Aspekte vorgeschlagen, das im Januar 2003 unter schweizerischer Leitung der FH Muttenz 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** gestartet werden konnte [11].

Wärmepumpen für hohen Temperaturhub

Speziell für den Sanierungsmarkt werden Wärmepumpen mit hohem Temperaturhub bis 75 °C benötigt. Im Jahr 2002 konnte die Wärmepumpe *Swissline* der Firma KWT AG ausgezeichnet werden, die die Anforderungen des Retrofit-Wettbewerbss nahezu erreichte. Ende 2003 bahnt sich eine Serien-Produktion dieser Wärmepumpe durch ein schweizerisches Hersteller-Konsortium an. Die prämierte Wärmepumpe erreicht Gütegrade von etwa 45 %.

In einem theoretischen Projekt wurde ein Gütegrad von 50 % für einen **gasgelagerten Mikroturbokompressor für Kältemittel** [12] berechnet. Im Mai 2003 wurde nun durch die Firma *OFTTech SA* (Spinoff der EPF Lausanne) ein Folgeprojekt gestartet, das den Bau und die messtechnische Untersuchung für einen **einstufigen Turbokompressor für eine Wärmepumpe** mit dem Arbeitsmedium R134a verfolgt [13]. Die elektrisch angetriebene Welle erreicht Drehzahlen im Bereich 180'000 bis 240'000 U/Min.. Die Randbedingungen sind dabei so gewählt, dass das Projekt im Erfolgsfall auf einen zweistufigen Turbokompressor ausgedehnt werden kann. Die zweistufige Version hat den Vorteil, dass die beiden Räder für die beiden Stufen auf einer Welle angeordnet werden können und sich dabei die Axialkräfte auf die Welle nahezu aufheben.

Die bisher gebauten zweistufigen Wärmepumpen wurden mit 2 separaten Kompressoren aufgebaut, die auch in zwei separaten Gehäusen untergebracht waren. Jeder Kompressor in seinem Gehäuse wird dabei durch einen eigenen Ölkreislauf geschmiert. Verschiedene Autoren stellten nun in Langzeitversuchen fest, dass sich



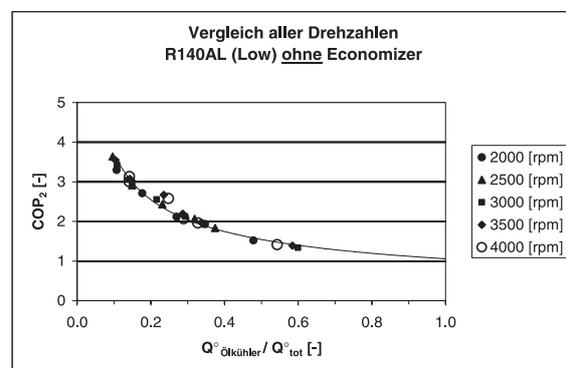
Figur 2: 2-stufige Versuchswärmepumpe Luft/Wasser zur Untersuchung der Ölmigration mit einer Wärmeleistung von $10 \text{ kW}_{\text{therm}}$ und R407C als Arbeitsmittel am LENI der EPFL [14]

das Öl in der ersten Kompressionsstufe anreichert und in der zweiten Stufe ein Ölmangetl entsteht. Komplizierte Ölverlagerungs-Verfahren mit entsprechend teuren Komponenten konnten das Problem teilweise beheben. In einem längeren Forschungsprojekt des *Laboratoire Energetique Industrielle* der EPFL wurde die **Ölmigration in einer echt zweistufigen Anlage mit zwei Scrollkompressoren** [14] untersucht. Zuerst musste hier eine neue Technologie für die Bestimmung der Ölkonzentration im Kältemittel gesucht werden. Die Messungen wurden schlussendlich mit dem kontinuierlichen Infrarot-Spektrometrie-Verfahren FT-IR erfolgreich durchgeführt. Es wurde ein Ölstrom von der Hochdruckstufe zur Niederdruckstufe von 5 – 10 g/min gemessen. Damit ist an einen kontinuierlichen Betrieb ohne Ölrückführungs-Einrichtung nicht zu denken. Der zweistufige Betrieb der Anlage (siehe Figur 2) beim Zustand A-7/W50 ergab jedoch eine Verbesserung des COP um 30 % und eine Erhöhung der Heizleistung von 24 % gegenüber dem einstufigen Betrieb. Damit wurde gezeigt, dass der echt zweistufige Betrieb energetische Vorteile bringt, allerdings durch die apparative Komplexität auch sehr teuer wird. Insbesondere die Komponenten des Ölkreislaufs sind kostenintensiv.

Durch eine zweistufige Betriebsführung können also 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** [15] bearbeitet.

Einsatz von natürlichen Kältemitteln

Die Erkenntnisse der negativen ökologischen Effekte der bisher eingesetzten Kältemittel äussern sich in immer strengeren gesetzlichen Rahmenbedingungen. Deshalb ist es zwingend, aber auch sehr erwünscht, wenn bezüglich natürlicher Arbeitsmedien – zum Teil entgegen den Wünschen der Wärmepumpen-Industrie – vermehrte Anstrengungen unternommen werden. Im Berichtsjahr wurde das Projekt **Kleinwärmepumpe mit Ammoniak** [16] beendet. In der Phase 3 konnten am Prototyp mit einem ölgeschmierten Flügelzellenverdichter *Rotovane*[®] und einer Economizer-Schaltung erfolgreich Messungen durchgeführt werden. Auch hier bewirkte der für die Schmierung, Dichtung und Heissgas-Kühlung notwendige Ölstrom eine erhebliche apparative Verkomplizierung der Anlage. Erst mit einiger Anstrengung ist es nun in der 3. Phase gelungen, reproduzierbare Resultate zu erhalten. Obwohl die Anlage mit dem Betriebspunkt A-20/W60 fähig ist, einen sehr hohen Temperaturhub einstufig zu bewältigen, ist der COP mit 1.4 doch sehr ernüchternd. Interessanterweise konnte gezeigt werden (Figur 3), dass sich der COP vom Verhältnis Wärme aus dem Ölkühler pro Gesamtwärme abhängt. Logischerweise tendiert dieser Quotient zum Grenzwert 1.0 für 100% Wärmeabfuhr aus dem Ölkühler, denn dann wäre die elektrisch angetriebene Wärmepumpe durch einen ohm'schen Widerstand ersetzbar. Auch ein kleiner Schraubenverdichter wurde getestet, doch die Wellendichtung des für Luftkompression optimierten Verdichters erwies sich nicht als langzeittauglich und musste durch eine Eigenkonstruktion ersetzt werden.



Figur 3: COP der Ammoniak-Wärmepumpe mit einem Flügelzellen-Verdichter *Rotovane*[®] in Abhängigkeit vom Verhältnis Wärme durch Ölkühler zu Gesamtwärme. Ein ähnliches Bild ergab sich auch für einen kleinen Schraubenverdichter mit einem Innenvolumen von 135 cm^3

Im Berichtsjahr sind 3 Projekte mit den natürlichen Kältemitteln Ammoniak und CO₂ neu gestartet worden. Am Institut für Energietechnik der FH Rapperswil wird das Projekt **Wärmepumpe mit Ammoniak für hohen Temperaturhub** [15] bearbeitet. Da der Flügelzellenverdichter und der Schraubenverdichter in kleinen Ausführungen aufgrund des hohen Verhältnisses Oberfläche zu Volumen nicht effizient sind, müssen andere Lösungswege eingeschlagen werden. Im Moment werden mittels einer Marktanalyse mögliche Lösungen für den Kompressionsvorgang gesucht.

Ammoniak wird auch in Kälteanlagen seit Jahren erfolgreich eingesetzt. Alle bekannten Kompressoren 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 wird an der FH Luzern zusammen mit der Firma *W.Wettstein AG* der **Einfluss von nicht-mischbarem Öl auf den Wärmeübergang im Verdampfer** (Start 1.1.04) untersucht.

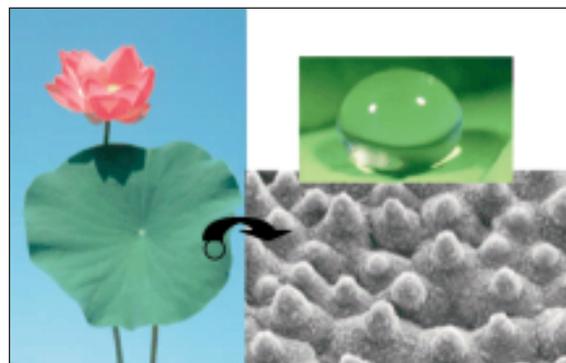
In einem Ende 2003 gestarteten Projekt mit den Firmen *awtec* und der Firma *Stiebel-Eltron* wird eine **CO₂-Wärmepumpe für Hauswasserheizung und Gebrauchswassererwärmung** [17] entwickelt, die auf schweizerische Verhältnisse optimiert ist. Der Anteil an Gebrauchswasser-Energie beträgt 50%, das Heizungswasser soll auf eine Vorlauftemperatur von 35°C erwärmt werden. Es wird ein COP von 4.5 vorausgesagt.

Verbesserung der Nutzung der Wärmequellen

Heute werden im Sanierungsmarkt häufig Luft/Wasser-Wärmepumpen eingesetzt, die die Wärme direkt oder über einen Luft-Glykol-Kühler aus der Umgebungsluft beziehen. 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 ist beträchtlich und beträgt etwa 10 % der elektrischen Antriebsenergie für den Kompressor. Im abgeschlossenen Projekt **Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Phase 2: Bewertung der Abtauprozesse** [18] wurden erfolgreich die Abtaumethoden Heissgasabtauung und Prozessumkehr untersucht. Im Folgeprojekt an der FH Buchs **Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Phase 3** [19] sollen Naturabtauung, Luftabtauung und andere

alternative Abtaumethoden experimentell untersucht und bewertet werden. Die Ergebnisse sollen in die Konzeption von zukünftigen Luftkühlern einfließen.

Da beim Abtauen bisher die ganz Eisschicht aufgetaut und damit verflüssigt werden muss, was einen hohen Energiebedarf benötigt, ist am *Institut optique appliqué* der EPFL im abgeschlossenen Projekt **Methodes de traitement de surface pour obtenir une diminution du givrage** [20] versucht worden, die Oberflächenstruktur so zu verändern, dass die Eisbildung erschwert und das Eis beim Auftauen als Festkörper abblättert und abrutschen kann. Dabei wollten die Forscher den in der Natur bekannten Lotus-Effekt nachahmen. Die Lotusblüte (siehe Figur 4) besitzt eine Oberfläche auf der die Wassertropfen abrollen und nicht anhaften können. Obwohl die Oberflächen von technischen Wärmetauschern ebenfalls in der richtigen Art mit beträchtlichem Aufwand verändert werden konnten, stellte sich der bekannte Lotus-Effekt nicht ein. Als Grund wird vermutet, dass die Wasserdampf-Moleküle aus der Umgebungsluft beim Vereisen direkt aus der Gasphase auf der Oberfläche desublimieren (als Festkörper absitzen) und die künstlich veränderbaren Oberflächenspannungs-Effekte zwischen Flüssigphase und Wärmetauscher-Oberfläche gar nicht entstehen können.



Figur 4: Die Lotusblume besitzt das perfekte Vorbild hydrophober Oberflächen. Wassertropfen können abrollen und haften nicht. An Verdampferoberflächen desublimiert aber der Wasserdampf aus der Umgebungsluft und bildet direkt eine Eisschicht [20]

Im neu gestarteten Projekt **LOREF Luftkühleroptimierung durch Reduktion von Eis- und Frostbildung** [21] am *Institut für Produktentwicklung* der HTA Luzern wird die Ursache der Frostbildung vertieft untersucht. In einer eigens aufgebauten Versuchsanlage konnten erste Erfahrungen und Messungen zur Frostentwicklung

und zum Abtauen gewonnen werden. Bei bestimmten Betriebsbedingungen konnte der gewünschte Effekt des Abgleitens von Eismatsch von den Wärmetauscherflächen nachgewiesen werden. Bei hydrophob beschichteten Platten blieben nach dem Abtauen weniger Tropfen zurück als bei einer unbeschichteten Oberfläche.

Eine andere bekannte Wärmequelle ist die Erdsonde. Die Erdsonde mit Glykolfüllung ist heute Stand der Technik, benötigt aber einen Wärmetauscher zwischen Sondenkreislauf und Kältekreis. Dieser zusätzliche Wärmewiderstand vermindert die Effizienz und könnte durch eine Direktverdampfung des Kältemittels in der Sonde eliminiert werden. Ein am *Labor für Thermodynamik und Kältetechnik* der FH Buchs geplantes Projekt **Erdsonde mit CO₂-Direktverdampfung** kann infolge personeller Engpässe erst im Jahr 2004 gestartet werden.

In grösseren Agglomerationen ist die **Nutzung der Abwärme aus Abwasser** eine interessante und lohnenswerte Alternative. 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** [22] wird 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 eines Tages verursacht werden, können in der Kläranlage weitgehend ausgeglichen werden. Dauernde Temperatursenkungen haben einen Einfluss auf die Ammoniumkonzentration im Abfluss der Kläranlage. Im Projekt ist

eine Methode zur Abschätzung der zulässigen Temperaturabsenkung erarbeitet worden.

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 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 zu 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 unter dem Namen *powerbloc SEM* weitergearbeitet. Gesuche für neue oder veränderte Stirlingmaschinen oder für die Untersuchung von Kombinationen von Fernwärmenetzen und Dampfturbinen in KVA's mussten aus verschiedenen Gründen abgelehnt werden.

Es ist geplant, Jahr 2004 mit dem WKK-Fachverband eine vertiefte Diskussion über notwendige Forschungsarbeiten aufzunehmen.

KÄLTE

Obwohl der Kältemarkt viel grösser ist als der Wärmepumpenmarkt konnten im Berichtsjahr aus Kapazitätsgründen keine Forschungsprojekte aus diesem Sektor unterstützt werden. Auch hier ist im Jahr 2004 eine vertiefte Zusammenarbeit mit dem *SVK Schweizerischen Verein für Kältetechnik* geplant. Einzelne Diskussionen über anzustrebende Forschungsprojekte wurden bereits mit verschiedenen Unternehmen geführt.

Nationale Zusammenarbeit

Durch die Mitarbeit von privaten Firmen in den meist sehr anwendungsnahen Projekten beteiligt sich die **Privatwirtschaft** intensiv in 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: www.waermepumpe.ch [37] oder in den ENET-News orientiert. An Workshops über abgeschlossene Forschungsprojekte wurden ausgewählte Personen aus Industrie und Markt orientiert. An der alljährlich stattfindenden UAW-Tagung konnte in ihrer 10. Auflage in Burgdorf das Thema **Wärmepumpen- noch effizienter und leiser** [33] vor einem grossen Publikum diskutiert werden. Dabei wurde vom bisherigen Programmleiter Martin Zogg auch eine Zusammenfassung der Forschungsarbeiten in den letzten 10 Jahren gezeigt [34]. Die zukünftige Ausrichtung des Forschungsprogramms wurde vom neuen Programmleiter unter dem Thema **Ausblick in die zukünftigen F&E-Aktivitäten im UAW-Programm** [32] dargelegt.

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 Weiterentwicklung

einer Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe diskutiert, eine Zusammenarbeit ist aber durch den Rückzug der betroffenen Firma nicht entstanden. Auch eine Zusammenarbeit bei der Weiterentwicklung des *powebloc SEM* wurde diskutiert. Das 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* [17] unterstützt werden.

Mit den **Branchenverbänden** besteht ein institutionalisierter Informationsfluss, denn alle wesentlichen Verbände haben ein Mitglied in der Begleitgruppe des Programms. In der *Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz* **FWS** arbeiten das BFE, Branchenverbände von Planern und Anbietern von Wärmepumpen, Elektrizitätswerke und Dienststellen von Kantonen zur Verbreitung zuverlässiger, effizienter und preiswerter Wärmepumpen zusammen. 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 2003 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 [23]. 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**. Diese aktive Rolle wird durch den von der Schweiz initiierten Annex 28 [11] 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. Holland hat ebenfalls ein Interesse nachgemeldet und möchte dem

Annex beitreten. Damit hat das Thema innerhalb des HPP die grösste internationale Beteiligung. Die Schweiz diskutiert auch eine Beteiligung im Annex 29 **Ground Source Heat Pumps** und im Special Task **The Role of Heat Pumping Energy Systems for a Sustainable Society**.

Am **International Congress of Refrigeration 2003** im August 2003 in Washington wurden die vom BFE unterstützten Projekte: **Verbesserung des Abtauens** [35] und **Dynamischer Wärmepumpentest** [36] einem internationalen Publikum vorgestellt. Die Schweiz ist durch das BFE; Mitglied im **International Institute of Refrigeration**, dessen Arbeiten auch für die Wärmepumpen-Forschung wichtig sind.

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

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die im Herbst 2003 bekannt gewordenen Budgetkürzungen haben zu einer Dämpfung der Nachfrage geführt. Im Jahre 2003 waren 34 Projekte am Laufen. Davon waren 7 Projekte neu und 9 konnten abgeschlossen werden. Wegen Verzögerungen bei der Ausführung der Anlagen konnten nicht alle verpflichteten Beiträge ausbezahlt werden. Es sind fast ausschliesslich Grossanlagen im Programm. Die Erfahrungen zeigen, dass die Arbeitszahlen von Grosswärmepumpen noch nicht den technisch möglichen Stand erreichen. Es wurden daher seitens der Programmleitung zwei Projekte lanciert, die einen stärkeren Druck auf die Branche ausüben sollen, um mehr Gewicht auf die Erreichung der vom BFE vorgegebenen Mindestarbeitszahlen zu legen. Es zeigt sich aber auch, dass die Unterstützung der Forschung allein im Wärmepumpenbereich nicht zwingend zu energetisch besseren Anlagen führt. Vielmehr bedarf es eines ergänzenden Instrumentes, das die *Umsetzung* der Forschungsergebnisse im Feld forciert. Dazu ist das P+D-Programm konzeptionell hervorragend geeignet. Es ist zu überlegen, wie dieses Instrument, resp. der dahinter stehende Grundgedanke, unter den veränderten budgetären Randbedingungen weiter geführt werden kann.

Die im Jahre 2003 laufenden und abgeschlossenen Projekte bearbeiten Anlagen in einem Leistungsbereich von 29 bis 1600 kW, wobei die mittlere Nenn-Wärmeleistung folgende 480 kW beträgt. Folgende Wärmepumpentypen sind Gegenstand dieser Projekte:

Anlagentyp	Anzahl Projekte
Wärmequelle Grundwasser	6
Wärmequelle Abwasser	8
Wärmequelle Erdreich (Erdwärmesonden)	6
Wärmequelle Bachwasser, Tunnelwasser u.a.	2
WKK-Anlagen	5
Neuanlagen	17
Sanierungen	3
Diverse Anlagen (inkl. Studien und Messprojekte)	13

Tabelle 1: Aufteilung der laufenden Projekte nach Wärmequellen und Bauart.

Laut mittelfristiger Planung des BFE sind im Leistungsbereich $< 50 \text{ kW}_{\text{th}}$ in erster Priorität Sanierungen bestehender Heizanlagen gemäss Pflichtenheft der Swiss Retrofit Heat Pump zu fördern. Zu diesem Thema ist im Berichtsjahr allerdings nur ein einziges Projekt lanciert worden.

Im Leistungssegment $> 50 \text{ kW}$ (Grosswärmepumpen) sind Sanierungen bestehender Heizungen und bei Neubauten vor allem Wärmekollektive zu fördern. Ueberlagert wird die Nutzung warmer Wärmequellen (Abwasser, Grundwasser und Erdreich) empfohlen.

ABGESCHLOSSENE PROJEKTE 2003

Thermische Leistung unter 50kW

Remplacement du chauffage électrique par des pompes à chaleur pour 8 villas individuelles, suivi sur 2 ans et transfert. [24]: In den Jahren 2001 und 2002 wurden in Plan-les-Ouates (GE) sechs Villen heizungstechnisch modernisiert, indem die bestehenden Elektrospeicherheizungen durch Wärmepumpen ersetzt wurden. Als Notheizung und für extrem kalte Tage ist eine 2kW-Widerstandsheizung eingebaut. Alle Häuser sind identisch und erhalten die gleichen Luft-Wasser-Wärmepumpen für Raumwärme und Brauchwarmwasser. Dadurch ist ein heizungstechnischer Quervergleich zwischen den einzelnen Häusern möglich. Der Wärmebedarf liegt im Durchschnitt bei etwa 18'000 kWh pro Haus und Jahr. Die Arbeitszahlen bewegen sich mit einer Ausnahme zwischen 2.4 und 3.0, mit einem Mittelwert von 2.7. Dieser Mittelwert liegt über dem Durchschnitt der im Projekt FAWA erfassten Wärmepumpen. Eine Anlage hatte im Jahr 2001 eine JAZ von 2.0, die sich aber 2002 auf 2.5 erhöhte. Es wurde auch eine Wirtschaftlichkeitsrechnung gemacht. Die Rückzahlzeiten des investierten Kapitals liegen ohne Berücksichtigung von Subventionen zwischen 15.2 und 43.3 Jahren, im Mittel bei 23 Jahren.

FAWA Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen [25]: Das Projekt FAWA kann als ein glückliches und weltweit einmaliges Projekt betrachtet werden. Es ging ursprünglich darum, statistisch gesicherte Daten der Jahresarbeitszahlen sowie Betriebsdaten von Kleinwärmepumpen für die Raumheizung zu erfassen. Diese Erhebungen sollen als Grundlage für die Qualitätssicherung von Wärmepumpenanlagen mit thermischer Leistung unter 20 kW dienen. Das Projekt hat alle Ziele er-

reicht und wurde Ende 2003 nach 8 Jahren abgeschlossen. Die Resultate werden an der 12. jährlichen Tagung des Bereiches in Burgdorf am 23. Juni 2004 ausführlich vorgestellt. Die wichtigsten Resultate des Projekts sind: Der Durchschnitt der Arbeitszahlen von Wärmepumpen mit Erdwärmeentnahme liegen bei etwa 3.4, derjenige von Luft-Wasser-Wärmepumpen bei 2.6. Die Streuung ist bei beiden Kategorien recht hoch. Die Jahresarbeitszahlen steigen mit dem Baujahr kontinuierlich an, wobei sich allerdings seit etwa 1999 eine Verflachung des Trends zeigt. Erfreulich ist auch die Tatsache, dass sich die Arbeitszahlen mit dem Alter der Maschinen kaum ändern. Die Störungshäufigkeit ist zudem sehr gering. Von 2004 bis 2007 geht das Projekt mit neuen Zielen weiter: aus den bisherigen 236 Anlagen werden etwa die Hälfte auf Langzeitverhalten weiter verfolgt. Neu dazu werden auch grosse Anlagen aufgenommen.

Kirche Môtier, Sanierung der Raumheizung [26]: In der denkmalgeschützten Kirche Môtier (FR) musste die etwa 50 Jahre alte Elektrospeicherheizung saniert werden. Die Wärmeabgabe erfolgt mittels Umluft an den Kirchenraum. Die installierte Heizleistung betrug 80 kW und der gemessene maximale Stromverbrauch 840 kWh pro Tag. Die Raumtemperatur wird in der Heizsaison an Werktagen auf 14 °C abgesenkt und an Wochenenden auf 20 °C hochgefahren. Die Sanierungsmassnahmen erfolgten im Jahre 2002 und umfassten einerseits eine Isolierung der Decke der Kirche und andererseits den Ersatz der Elektrospeicherheizung. Heizungseitig wurde eine Wärmepumpe mit zwei Leistungsstufen installiert. Als Wärmequelle dienen drei Erdwärmesonden à 175 m Länge. Die Wärmeabgabe erfolgt direkt an die Raumluft. Dank der neuen Deckenisolation konnte der Wärmebedarf reduziert werden. Er wurde neu mit 35.5 kW Wärmebedarf bei -7 °C Umgebungstemperatur gerechnet. Die gesamten Umbaukosten beliefen sich gemäss Bauabrechnung und inklusive der Deckenisolation auf Fr. 131'000 (inkl. MWSt.), wobei zu bemerken ist, dass der Abbruch der alten Heizanlage in Fronarbeit erfolgte und somit keine direkten Kosten verursachte.

Der Umbau ist sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht als erfolgreich zu betrachten. Die Anlage wurde vom Herbst 2001 (alte Anlage) bis Frühjahr 2003 (neue Anlage) messtechnisch beobachtet. Der Stromverbrauch konnte von rund 55'000 kWh pro Jahr bei der Speicherheizung auf etwa 16'750 kWh mit der Wärmepumpe gesenkt werden. 55 % der bezogenen Strommenge fallen auf den Niedertarif.

Die Einsparungen bei den Heizkosten werden mit ca. Fr. 6'800 pro Jahr angegeben. Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe (inklusive der Hilfsantriebe) beträgt 3.31 und die Energiekosten 4.95 Rp. pro kWh Heizwärme.

Thermische Leistung über 50kW

Beim **Wärmeverbund Morettina**, [27] der *Calore SA* in Locarno handelt es sich um einen WKK-Anlage mit Wärmepumpe (Wärmequelle Grundwasser). Die Anlage wurde 1997 in Betrieb genommen. Sie besteht aus einer elektrisch angetriebenen Wärmepumpe mit 760 kW Wärmeleistung (gleichzeitig als Kältemaschine genutzt) und einem flüssiggasgetriebenen Blockheizkraftwerk (430 kW thermisch), das auch als Notstromaggregat dient, sowie aus zwei ebenfalls flüssiggasbetriebenen Spitzenlastkesseln à je 1150 kW Heizleistung. Die Anlage erfüllte zu Beginn Erwartungen bezüglich Anteil alternativer Wärmeerzeugung nicht. Es wurden dafür steuerungs-technische und hydraulische Ursachen vermutet. Im Jahre 2000 erfolgte mit Unterstützung des BFE eine Sanierung der Anlage, was sich als voller Erfolg herausstellte. Die dreijährige Erfolgskontrolle ergab folgende Kennzahlen: Wärmeproduktion 17.8% durch Wärmepumpe, 28.8% durch das BHKW und 53.8 % durch die beiden Gasheizkessel. Die Laufzeiten des BHKW betragen etwa 4400 h pro Jahr. Beim BHKW beträgt die elektrische Energieerzeugung etwa 28.5% des Heizwertes und die Nutzwärmeabgabe rund 55%. Elektrische Energieerzeugung und Nutzungsgrad liegen damit leicht unter den Minimalanforderungen des BFE. Die Arbeitszahl der Wärmepumpe wird mit 3.2 angegeben. Das Sanierungsziel, einen störungsfreien und energie-effizienten Betrieb zu gewährleisten, wurde erreicht.

Bei der **Optimierung der Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlage Eggmatt in Mühlethurnen** [28] werden 5 Reiheneinfamilienhäuser mit einem Heizleistungsbedarf von 86 kW bei -8°C Auslegetemperatur zentral mit einer elektrisch angetriebenen Wärmepumpe mit Heizwärme versorgt. Die Brauchwarmwasserversorgung erfolgt ebenfalls zentral durch die Wärmepumpe. Als Wärmequelle dient eine Erdwärmesondenanlage. Als Besonderheit der Anlage war vorgesehen, das Erdreich rund um die Erdwärmesonden durch einen parallel geschaltete und unverglasste Solaranlage nachzuladen. Daher wurden die Erdwärmesonden mit einer Wärmeentnahme von 100 W pro Laufmeter sehr knapp ausgelegt. Die Solaranlage vermochte die in sie gesetzten Erwartungen nicht zu erfüllen. Dies führte zu einer starken Abkühlung des Erdreiches und zur

dessen Vereisung. Die Soletemperatur fiel auf bis zu $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Sanierung umfasst in der ersten Etappe eine ungefähre Verdoppelung der Erdwärmesondenlänge, so dass die spezifische Wärmeentnahme neu nur noch 47 W/lfm beträgt. Die Arbeitszahlen der Wärmepumpe betragen im Winter 3.5 und im Sommer 3.0. Die solare Erwärmung des Erdreiches bringt in diesem Zusammenhang energetisch wenig (was an sich schon lange bekannt ist). In einem zweiten Schritt soll die Solaranlage durch verglaste Kollektoren ersetzt und damit das Brauchwarmwasser vorgewärmt werden.

Der Kältebedarf für die Eisbahn der **Eissporthalle St. Jakobarena in Münchenstein** [29] wird durch zwei NH_3 -Kältemaschinen gedeckt, wobei die eine Kältemaschine (500 kW Kälteleistung) ausschliesslich für die Kälteerzeugung arbeitet, während die zweite umschaltbar ist und nur bei Kältespitzen (Eiseisen der Eisbahn) als Kältemaschine eingesetzt wird. In der übrigen Zeit wird sie als Wärmepumpe für die Erzeugung von Wärme für Heizungs- und Lüftungszwecke eingesetzt. Die Messungen der ersten Saison (12.12.02-23.5.03) haben folgende Kennzahlen ergeben: Leistungszahl Kälte 3.6, Leistungszahl Wärmepumpe 5.4 (!).

Zentrale Wärmepumpenanlage Schlossmatt, Münsingen [30]: 1992 wurde ein Wärmeverbund

mit einer Wärmepumpe von 750 kW Heizleistung installiert. Als Wärmequelle dient gereinigtes Abwasser aus der ARA Münsingen. Die Spitzenlastdeckung erfolgt durch einen ölbeheizten Heizkessel von 1450 kW Heizleistung. 1997 wurde eine zweite Wärmepumpe mit 1650 kW Heizleistung eingebaut. Die Bezugsspitze liegt bei 2400 kW. Der Versorgungsanteil der Wärmepumpen liegt bei 85 %. Es besteht die Absicht, den Wärmeverbund durch Anschluss eines weiteren Quartiers zu vergrössern. Damit verbunden sind, wenn möglich, zwei Nachteile der Anlage zu beheben. Die Arbeitszahl der Wärmepumpen ist mit 2.6 sehr tief. Der Grund dafür liegt hauptsächlich in der hydraulisch nicht optimal ausgelegten Abwasserleitung resp. deren Pumpen. Das gereinigte Abwasser muss über eine Distanz von 2.2 km heran geführt werden, was mit erheblichen Druckverlusten und Pumpenleistungen verbunden ist. Der zweite Nachteil liegt darin, dass die Wärmequelle einen Parallelbetrieb der beiden Wärmepumpen nicht zulässt. Es ist daher nach einer ergiebigeren Wärmequelle zu suchen. Nachteilig sind auch die Reinigungskosten für die Abwasserwärmetauscher. Die Studie zeigt verschiedene Sanierungsvarianten auf, um die angesprochenen Mängel zu beheben.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Die im **Konzept der Energieforschung des Bundes 2000 – 2003** [38] anvisierten Ziele konnten mit den nun abgeschlossenen **Forschungsarbeiten** grösstenteils erreicht werden. Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln haben jedoch die Marktreife noch nicht erreicht. Erfreulich ist die Gründung einer Produktionsgemeinschaft für die vom Forschungsprogramm geförderte *Swiss Retrofit Heat Pump* für den Sanierungsmarkt. Hier ist noch eine Verbesserung des Luftkühlers notwendig. Die im **Konzept der Energieforschung des Bundes 2007 – 2007** [38] 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 [28]. Ein Problem stellt sich hier durch das träge Verhalten der durch den Kälte-Markt dominierten Komponenten-Hersteller, 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 bekommt die Möglichkeit, mit Wärmepumpen im Sommer zu kühlen, aufgrund der meteorologischen Entwicklung und aufgrund des erhöhten Komfort-Bedarfs der Bevölkerung eine immer grössere Bedeutung. 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-Integrationsebene. 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

auch im nächsten Jahr nicht signifikant steigen werden, ist eine grössere Verbreitung der WKK-Anlagen im nächsten Jahr nicht anzunehmen. Trotzdem sollen die begonnenen Entwicklungen fortgesetzt werden, da die gesamtenergetische Integration der WKK-Anlagen ein enormes Einsparungspotential an Brennstoffen und an CO₂-Ausstoss beinhalten [27].

Bei der **Umsetzung** zeigt sich, dass Grosswärmepumpen nicht a priori bessere Arbeitszahlen liefern 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. Dieser Vorgabe wird mehr Nachdruck verleihen, indem die Beitragshöhe von der (geplanten) Arbeitszahl abhängig gemacht wird. Ferner hat es sich gezeigt, dass die Investitionskosten pro installiertem kW Heizleistung stark variieren können. Es wird daher vermehrt dazu übergegangen, die Finanzbeiträge nicht mehr von den vom Gesuchsteller aufgerechneten nicht amortisierbaren Kosten abzuleiten, sondern von allgemeinen Erfahrungszahlen.

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 die Unterstützung und das Monitoring im Bereich der Umsetzung unverzichtbar und effizient. P+D-Abklärungen sind auch im internationalen Vergleich ein-vorbildliches Instrument.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2003 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

Alle Berichte (ausser [7]) 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) ENET 220216 ♦ 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, 1ère partie: fiches techniques** (SB) ENET 220217 ♦ 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) ENET 220218
- [2] H.R. Gabathuler, H. Mayer (gabathuler.ag@bluewin.ch), Gabathuler AG, Diessenhofen: **Wärmepumpenanlage mit Heizkörperheizung ohne Speicher** (JB) ENET 230225
- [3] H.R. Gabathuler, H. Mayer (gabathuler.ag@bluewin.ch), Gabathuler AG, Diessenhofen & E. Shafai, R. Wimmer, IMRT/ETH Zürich: **Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase 2: Erprobung in einem Wohnhaus**, (SB) ENET 220142
- [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: **Pulsbrei-**

- tenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase 3: Vergleich der PBM-Regler auf dem dynamischen Prüfstand** (SB) ENET 230223
- [5] 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) ENET 240021
- [6] H.R. Graf (hansrudolf.graf@sulzer.com), Sulzer Innotec, Winterthur: **Lärmreduktion bei Luft/Wasser- Wärmepumpenanlagen - Grundlagen und Massnahmen** (SB) ENET220193
- [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)
- [8] 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) ENET 230183
- [9] A. Montani (andre.montani@axpo.ch), Wärmepumpentestzentrum Töss, Winterthur: **Wärmepumpentest für die kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung** (SB) ENET 230224
- [10] C.Wemhöner, Th. Afjei (c.wemhoener@fhbb.ch), FHBB Muttenz: **Operating Agent IEA HPP Annex 28** (JB) ENET 230226
- [11] C.Wemhöner, R.Dott, P.Keller, Th. Afjei (c.wemhoener@fhbb.ch), FHBB Muttenz: **Calculation method for the seasonal performance of heat pump compact units and validation** (annual report) ENET 230227
- [12] J. Schiffmann (jurg.schiffmann@ofttech.com), OFFTECH SA, Lausanne: **Compresseur radial pour pompe à chaleur bi-étagée, Phase 1: Etude de faisabilité**, (SB) ENET 220195
- [13] 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) ENET 220195
- [14] M. Zehnder, D. Favrat (daniel.favrat@epfl.ch), Laboratoire d'énergétique industrielle, EPFL Lausanne: **Analyse de la migration d'huile dans les pompes à chaleur mono- et bi-étagées** (SB) ENET 230161
- [15] D.Stauffer (dstauffer@hsr.ch), FH Rapperswil & UNEX AG Zürich: **Ammoniak-Kleinwärmepumpe für hohen Temperaturhub**, (JB) ENET 230229
- [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) ENET 230166
- [17] R.Kern, J.Ganz, (roland.kern@awtec.ch), awtec AG, Zürich: **CO2-Heiz- und Gebrauchswasser-Wärmepumpe** (JB) ENET 230230
- [18] S. Bertsch, M. Ehrbar (ehrbar@ntb.ch), FH Buchs & P.Hubacher, Hubacher Engineering, Engelburg: **Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Phase 2: Bewertung der Abtauprozesse** (SB) ENET 220187
- [19] S. Bertsch, M. Ehrbar (ehrbar@ntb.ch), FH Buchs & P.Hubacher, Hubacher Engineering, Engelburg: **Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Phase 3** (JB) ENET 230231
- [20] P. Hoffmann, G.Kulik, M.Zehnder (patrik.hoffmann@epfl.ch), Institut d'Optique Appliquée, EPFL Lausanne: **Oberflächenbehandlung zur Vereisungsverringerung** (SB) ENET 230222
- [21] L.Berlinger, K.Hilfiker, M.Imholz, R.Sahinagic, (kfhiklfiker@hta.fhz.ch), HTA Luzern, Horw: **Luftkühloptimierung durch Reduktion von Eis- und Frostbildung** (JB) ENET 230232
- [22] O. Wanner, P.Dalavy, J.Eugster, V.Panagiotidis, H.Siegrist (wanner@eawag.ch), EAWAG, Dübendorf: **Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen** (JB) ENET 230233

- [23] S. Roth, (stefan.roth@axpo.ch), A. Montani, Wärmepumpen-Testzentrum Töss, Winterthur & M. Ehrbar, FH Buchs & K. Eggenschwiler, EMPA Dübendorf: **Vertretung der Schweiz in den Arbeitsgruppen des CEN TC113** (JB) ENET 230234

Liste der (2003 abgeschlossenen) P+D-Projekte

- [24] E. Conti, Conti&associés ingénieurs SA, (e.conti@conti-ingenergy.ch), Versoix: **Remplacement des chauffages électriques directs par des pompes à chaleur dans 8 villas à Genève; Rapport après mise en service et réception finale – Rapport final**, (SB) ENET 210075
- [25] M. Ehrbar, M. Erb, P. Hubacher, (he-ko@bkuewin.ch, markus.erb@eicher-pauli.ch, ehrb@ntb.ch), **Feldanalyse von Wärmepumpen-Anlagen FAWA**, (SB) ENET 240016
- [26] V. Grizzetti, EWB Energie Wasser (vincenzo.grizzetti@bern.ch) Bern: **Kirche Môtier Sanierung der Raumheizung**, (SB) ENET 230084
- [27] S. Lanz, Dr. Eicher + Pauli AG, (stefan.lanz@eicher-pauli.ch), Bern, **Wärmeverbund Morettina in Locarno**, (SB) ENET 240018
- [28] B. Eggen, Dr. Eicher + Pauli AG, (bernhard.eggen@eicher-pauli.ch) Bern: **Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlage Eggmatt in Mühlethurnen; Betriebsoptimierung**, (SB) ENET 230173
- [29] P. Frey, L. Bertozzi, P. Frey und Partner, (info@pfp-eng.ch), Wilen bei Will und Chur, **Eissport-halle St. Jakobarena in Münchenstein/BL**, (SB) ENET 240019
- [30] B. Eggen, Dr. Eicher + Pauli AG, (bernhard.eggen@eicher-pauli.ch) Bern: **Zentrale Wärmepumpenanlage Schlossmatte in Münsingen/BE**, (SB) ENET 240020

Referenzen

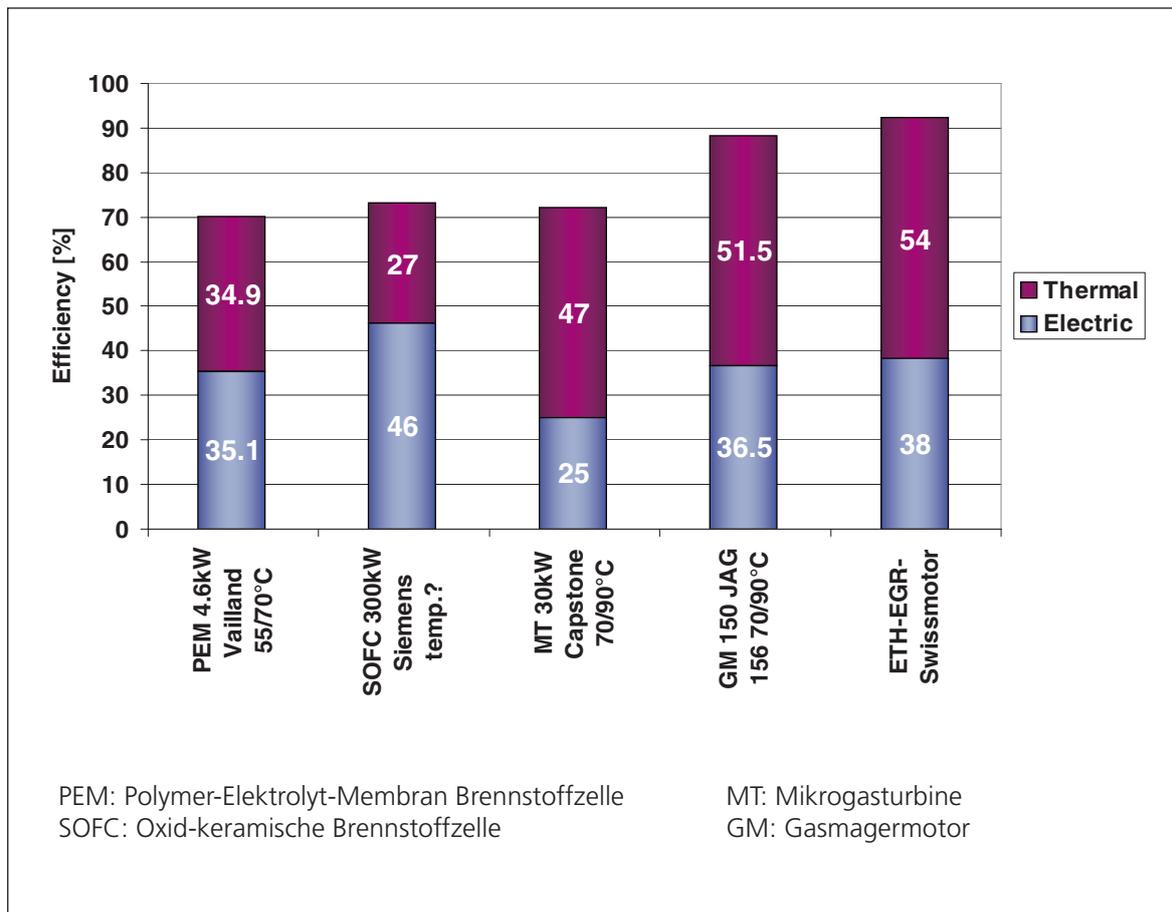
- [31] M. Zogg: **Wärme und Strom aus Brennstoffen – effizient und umweltschonend**, Gas-Wasser-Abwasser gwa 82(2002)12, 907/912; Download ab [33].
- [32] Th.Kopp: **Ausblick in die zukünftigen F+E-Aktivitäten im UAW-Programm**, aus Tagungsband zur 10. UAW-Tagung vom 25.6.03, Seiten 87 – 96, 2003. ENET xx
- [33] S.Bertsch, Th.Afjei, H.R.Graf, E.Shafai, E.Geisser, M.Zogg, Th.Kopp, M.Ehrbar, F.Rognon: **Wärmepumpen – noch effizienter und leiser**, Tagungsband zur 10. UAW-Tagung vom 25.6.03 in Burgdorf, 2003. ENET xx
- [34] M.Zogg: **Rückblick auf zehn Jahre BFE-Wärmepumpenforschung**, aus Tagungsband zur 10. UAW-Tagung vom 25.6.03, Seiten 73 – 86, 2003. ENET xx
- [35] S.Bertsch, M.Ehrbar, B.Hubacher, P.Hubacher: **Comparison of Defrosting Electricity Consumption in the Reverse Cycle and the Hot Gas Method**, ICR0218, Proceedings, International Congress of Refrigeration 2003, Washington USA.
- [36] M.Ehrbar, B.Gubser, B.Hubacher, E.Shafai, L.Wirth, D.Zogg: **On part-loadbehaviour of on/off-controlled heat pumps**, ICR0116, Proceedings, International Congress of Refrigeration 2003, Washington USA.
- [37] **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.
- [38] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2000 – 2003 und 2004 – 2007:** www.energieschweiz.ch/internet/03095/index.html?lang=de

FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Alphons Hintermann

alphons.hintermann@bfe.admin.ch



Brennstoffzellensysteme im Vergleich mit Verbrennungstechnologien

(Quelle: Jenbacher AG und K. Boulouchos ETHZ)

Aktuelle Brennstoffzellensysteme haben noch eine lange Entwicklungszeit vor sich, um die Leistung und Zuverlässigkeit moderner thermischer Verbrennungssysteme zu erreichen, resp. zu überbieten und mit den Kosten gleichzuziehen.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Fossile Energieträger decken nach wie vor den Grossteil unseres Energiebedarfs. Das Programm *Verbrennung* leistet Beiträge zur **simultanen Verbesserung der Energieeffizienz technischer Verbrennungssysteme sowie zur Reduktion derer Emissionen**. Mit diesen Zielsetzungen werden die Grundlagen moderner Verbrennungstechnologien erarbeitet, verstanden und in käuflichen Produkten umgesetzt.

Das Programm stellt längerfristig seine Mittel dafür bereit, dass die Kontinuität in der **Forschung** gewährleistet ist und dass unsere Forscher weiterhin an vorderster Front mithalten können. Die seit Beginn des Programms definierte **Fokussierung der Forschung auf experimentelle Messtechnik, numerische Simulation und Schadstoffreduktion mit optimaler Energieeffizienz** hat sich bewährt. Die Projekte in diesen Schwerpunkten haben oft generischen Charakter, womit das erarbeitete Fachwissen in allen Verbrennungstechnologien einsetzbar ist. So findet beispielsweise die in den letzten Jahren vertieft geförderte Untersuchung der Spray-Verbrennung ihre Anwendung und Umsetzung in Gasturbinenbrennkammern, in Industriefeuerungen und bei der motorischen Verbrennung.

Bei der **Umsetzung** liegen die Schwerpunkte in der **Motoren- und Gasturbinentechnologie**. Dabei ist die Zusammenarbeit mit namhaften Motorenherstellern und der Zulieferindustrie der Automobilbranche zentral. So pflegen die Institutionen des ETH-Bereichs Kontakte zu mehr als einem Dutzend grossen Unternehmen, welche die Effizienzgewinne durch neue Forschungserkenntnisse in grosse Serien vervielfachen.

Die generellen **Ziele** im Mehrjahresprogramm *Feuerung und Verbrennung* [37] 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,
- Vernetzung der Hochschulaktivitäten (ETH Zürich, PSI und EMPA) mit den Fachhochschulen.

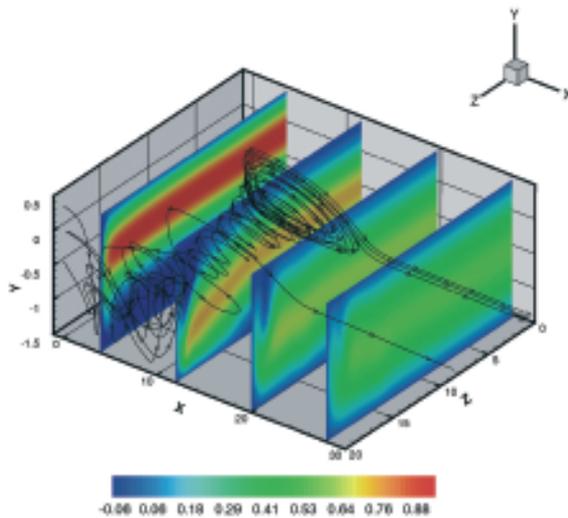
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

GRUNDLAGEN DER VERBRENNUNG

Ziele des Projekts ***Turbulente, chemisch reaktive Strömung in Motorenbrennräumen*** [1] waren die direkte numerische Simulation (DNS) zum vertieften Verständnis von generischen Fällen der Wechselwirkung zwischen Turbulenz und chemischer Kinetik einzusetzen und Wege aufzuzeigen, wie gewisse Berechnungen für Flammen von technischer Bedeutung (in Anwendungen beim Industriepartner) künftig modellfrei durchgeführt werden können. Beide Ziele sind praktisch vollständig erreicht worden. Beispiele für die Beschreibung von komplexen Interaktionen zwischen Strömungsparametern und laminaren Flammen sind einerseits die detaillierte Untersuchung des Übergangs von gestreckten Diffusionsflammen zu vorgemischten edge-flames und umgekehrt und andererseits werden instationäre Effekte (Löschen und Wiederezünden) von Diffusionsflammen am Gegenstrombrenner untersucht. Beide Fälle sind wesentlich für das Verständnis und die Modellierung der turbulenten Verbrennung. In Zusammenarbeit mit dem Argonne Na-

tional Laboratory wurde eine voll parallelisierte 3-D-Version für komplexe Geometrien mit Einzschritt-Reaktionskinetik fertiggestellt und ist für Simulationen von Flammen in turbulenten Strömungen oder Übergangsströmungen einsetzbar.

In der *ERCOFTAC*-Untersuchung ***Induced Global Unsteadiness and Sidewall Effects in the Backward-Facing Step Flow*** [29] wurden grundlegende numerische und experimentelle Studien an einer dreidimensionalen laminaren Strömung über eine rückwärts gerichtete Stufe beschrieben. Im Einklang mit früheren Beobachtungen konnte zum Thema Seitenwandeffekte sowohl experimentell als auch durch Simulation gezeigt werden, dass es bei laminarer Strömung einen Strahl an der unteren Wand gibt, der auf die Kanalmitte gerichtet ist (Fig. 1). Der Effekt der Seitenwände auf die primäre und die oberen Wandrezirkulationszonen wurde demonstriert und damit die bisherige Diskrepanz zwischen Experimenten und zweidimensionalen Simulationen in der Literatur erklärt.

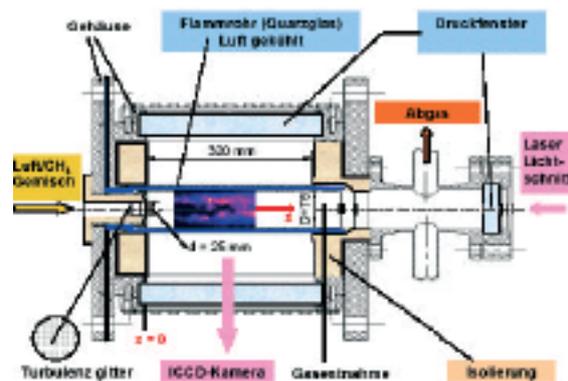


Figur 1: Wege von Wandstrahlen in einer laminaren/turbulenten Strömung sowie Geschwindigkeitsprofile in verschiedenen yz-Schnittebenen.

Das Projekt **Struktur turbulenter Vormischflammen unter Hochdruck** [2] wurde abgeschlossen. Neben dem Aufbau des Hochdruck-Verbrennungsprüfstandes (Fig. 2), der Durchführung zweier Vorstudien zur Flammenstabilität und zu laminaren Flammen stand vor allem die Untersuchung des Turbulenzeinflusses auf die Flammenposition und -struktur in Abhängigkeit von Druck, Temperatur, Luftzahl und Geschwindigkeit im Vordergrund. In enger Zusammenarbeit zweier PSI-Gruppen wurde der Beginn der Flammenfront mittels **Laserinduzierter Fluoreszenz** des OH-Radikals (**OH-PLIF**) erfolgreich gemessen. Die Turbulenzcharakterisierung der Strömung konnte mittels **Particle Image Velocimetry (PIV)** erfolgreich durchgeführt werden. Die experimentelle Bestimmung der Turbulenzintensität und des turbulenten Makrolängenmasses waren wichtige Voraussetzungen für die gezielte Untersuchung des Einflusses der Turbulenz auf die Position und die Struktur der Flammenfront. Die Ergebnisse umfangreicher Messungen zeigen, dass die Turbulenzintensität proportional zur massenstromgemittelten Geschwindigkeit ist und diese in der Kernzone durch den Einsatz verschiedener Turbulenzgitter gezielt variiert werden kann. Das turbulente Makrolängenmass am Brennkammereintritt entspricht ungefähr dem halben Bohrungsdurchmesser des Turbulenzgitters. Infolge Dissipation der kleinen Wirbel steigen die Werte für das Makrolängenmass mit zunehmender axialer Distanz zum Brennkammereintritt an.

Die OH-PLIF Messungen zeigen, dass die Flammenposition unabhängig vom Brennkammerdruck ist. Dies lässt sich als Druckunabhängigkeit der tur-

bulenten Flammengeschwindigkeit interpretieren. Den grössten Einfluss auf die Flammenposition (Flammengeschwindigkeit) hat die Luftzahl λ . Ein höheres λ führt aufgrund der niedrigeren Verbrennungstemperatur und damit der niedrigeren Reaktionsrate zu einer kleineren turbulenten Flammengeschwindigkeit, in deren Folge sich die Flamme weiter stromab stabilisiert. Die Erhöhung der Turbulenzintensität in der Kernzone durch die Verwendung entsprechender Turbulenzgitter verkürzt die Flamme, da der Stoff- und Wärmeaustausch intensiviert wird. Dies zeigen die statistische Auswertung der OH-PLIF Einzelschussbilder und die gemittelten OH-PLIF-Aufnahmen. Die Fortsetzung dieser experimentellen Arbeiten erfolgt im P+D-Projekt **Struktur- und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruckflammen** [13].



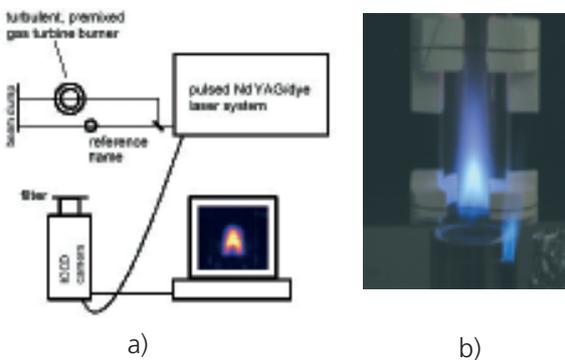
Figur 2: Horizontalschnitt durch den Hochdruck-Verbrennungsprüfstand (Quelle PSI)

OPTISCHE MESSMETHODEN

Das PSI konzentriert sich im Projekt **Verbrennungsreaktionen in Gegenwart sauerstoffhaltiger Brennstoffe** [3] auf die Untersuchung von Formaldehyd, ein wichtiges Zwischenprodukt in Flammen. Formaldehyd, H_2CO , spielt eine wesentliche Rolle für die Zündmechanismen eines brennbaren Gemisches. Zudem hängt die Erscheinung von H_2CO mit der Tendenz zur Russbildung zusammen. Mit resonanten, nichtlinearen spektroskopischen Methoden konnten die Spektren von H_2CO und HCO untersucht werden. Die Messungen liefern Daten über angeregte Zustände und den Energietransfer von Rotations- und Vibrationsanregungen im elektronischen Grundzustand dieser Moleküle. Die Information über Relaxationsraten ist wesentlich, um abschätzen zu können, in welchen Zuständen Moleküle in eine nachfolgende Reaktion eintreten. Mit anderen Methoden konnten wichtige, bisher noch nicht

vermessene Moleküldaten bestimmt werden. Ausserdem konnten mit Femtosekunden-Lasern zustandsspezifische Stossparameter für ein modifiziertes Stossmodell eruiert werden.

Eine weitere PSI-Gruppe befasst sich im Projekt **Quantitative Laser Induced Fluorescence (LIF) in Combustion** [4] mit der Anwendung von LIF sowohl bei Gasturbinen- als auch bei Laborbrennern (Fig. 3b). Ziel für beide Brenner ist die Bestimmung von Ort, Form und wenn möglich der Bewegung der Flamme, sowie von der Konzentration des Brennstoffs und anderen Komponenten.



Figur 3: a) Schematischer Aufbau der CH LIF- und Chemilumineszenz Messungen
b) Bilder der turbulenten, vorgemischten Flamme und der Referenzflamme des Bunsenbrenners.

Im Jahr 2002 konzentrierten sich die 2-D-LIF-Anwendungen vor allem auf das Radikal OH. Damit konnten einige Beiträge zur Klärung der thermoakustischen Verbrennungsinstabilitäten beim Industriepartner *Alstom* geleistet werden. Im Berichtsjahr wurden die Grenzen der 2-D-LIF Methode (Fig. 3a) für die Radikale CH und CH_2O ausgelotet. Das Radikal CH ist ein idealer Marker der Flammenfront, während das Radikal CH_2O vor allem quantitative Resultate zur Wärmefreisetzung in Flammen liefert. Bis zu λ -Werten von 1,5 konnten für turbulente Flammen brauchbare CH-LIF-Bilder gemessen werden. Für typisch magere, turbulente Flammen ($\lambda > 1.8$) war die CH-Konzentration unter der Auflösungsgrenze der Messapparatur. Damit ergeben sich keine komplementären Daten zu den früher gemessenen OH-Daten, die Aussagen zur Flamme selbst liefern. Die in diesem Projekt erarbeiteten experimentellen Grundlagen sind wichtige Elemente für das P+D-Projekt [13] und das KTI-Projekt **Thermo-Acoustic Instabilities in Gas Turbines** [25].

Diese LIF-Experimente, ergänzt durch spontane Raman Streuungsexperimente, dienen auch als Datenbasis zur Validierung der verschiedenen am

LAV der ETHZ entwickelten Rechencodes [38]. Validierte Rechencodes kommen immer mehr auch bei Industriepartnern zum Einsatz und leisten einen Beitrag zur Kostensenkung bei der Entwicklung effizienterer, emissionsärmerer Verbrennungstechnologien.

Das Projekt **Experiment turbulente Gegenstromflamme** [5] wird im Jahr 2004 mit 2 Dissertationen beendet werden. Die dort erarbeitete Datenbasis wird eine hervorragende Grundlage für zukünftige Modell-Validierungen darstellen.

NUMERISCHE SIMULATION VON VERBRENNUNGSPROZESSEN

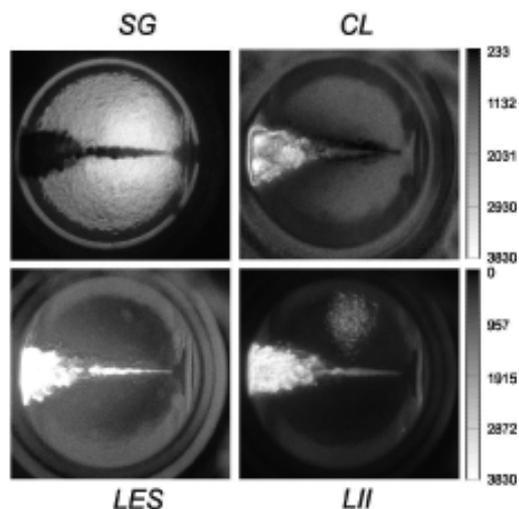
Im interdisziplinären Projekt **Large Eddy-Simulation (LES) in der turbulenten Verbrennung** [6] der vier ETH-Zürich Institute: *Seminar für angewandte Mathematik (SAM)*, *Institut für Fluidodynamik (IFD)*, *Labor für Verbrennungsmotoren (LAV)* und *Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTNT)* entwickelt das SAM eine neuartige, mehrdimensionale Lagrange-Transportmethode. Diese basiert auf Darstellungen von Strömungselementen als *Lagrange'sche Finite Volumina*, die bewegt und deformiert werden. Die Simulation mit *Lagrange'schen* Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen reduziert die zur Beschreibung der wichtigen chemischen Reaktionen nötigen Grössen erheblich. Vom LTNT wurde ein transienter Flamelet-Code in die kommerzielle Software CFX5.6 implementiert und getestet und soll später in den Code vom SAM implementiert werden. Der LAV und IFD Projektteil, in dem eine turbulente Diffusionsflamme mittels LES berechnet werden soll, wurde in die Teilprojekte: 1.) Inkompressible LES einer Kanalströmung; 2.) Kompressible (für kleine Mach-Zahlen) LES eines runden Jets mit Mischung und veränderlicher Dichte, aber ohne chemische Reaktionen; 3.) LES einer kompressiblen (für kleine Mach-Zahlen) und turbulenten Diffusionsflamme aufgeteilt. Im Berichtsjahr wurde das Teilprojekt 1 beendet, in welchem die inkompressiblen Kanalströmungen für eine Reynolds-Zahl von 2800 simuliert wurden. Die Resultate (Wand-Reynoldszahl, gemittelt Geschwindigkeitsprofil in Strömungsrichtung und die Reynolds-Spannungen) stimmen gut mit exakten Ergebnissen der direkten numerischen Simulation überein. Damit ist auch die Implementierung des LES-Modells für die Strömung abgeschlossen. Der Code für die kompressible Fluidynamik (SAM) sowie ein Flamelet-Model (LTNT) sind fertiggestellt und beide Programme können zu einem gemeinsamen Programm zur Grobstruktursimulation von Diffusionsflammen vereint werden.

Durch die Weiterentwicklung 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** [7] voran. Die DNS ist ein potentes Werkzeug bei der detaillierten Analyse von Verbrennungsphänomenen. Das diesem zugrunde liegende System von Gleichungen wird mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung gelöst und liefert dadurch zusätzliche Informationen. Da DNS mit sehr grossem Rechenaufwand verbunden ist, sind effiziente numerische Algorithmen und die Parallelisierung grundlegende Voraussetzungen. In den letzten Jahren hat das LAV mit seinem zweidimensionalen DNS-Code grundlegende Phänomene in der Verbrennung mit detaillierten Transporteigenschaften und Chemie untersucht. Dieselben Algorithmen werden jetzt in einen parallelen dreidimensionalen Code für nicht reaktive Strömungen implementiert. Dieser erweiterte Code wird die Basis für die Untersuchung laminarer und transien-ter Verbrennungsphänomene bilden und später zur Simulation der turbulenten Verbrennung weiter entwickelt. Im Berichtsjahr wurde ein Einzschrittmeechanismus für die chemische Reaktion und ein vereinfachter Transportmechanismus in den dreidimensionalen Code implementiert und auf einem neu am LAV von der ETH finanzierten 64-CPU Cluster validiert. Die perfekte Skalierbarkeit des parallelen Codes erlaubte es, Instabilitäten in Diffusionsflammen nahe der Auslöschung in einem dreidimensionalen Jet zu untersuchen. Ähnlich wie in Experimenten, welche an der EPFL durchgeführt wurden, zeigten die Simulationen eine zellenförmige Struktur in der Flamme, die aus zwei bis sechs Zellen besteht. Für ein und dasselbe Parameterset wurden koexistierende, zellenförmige Strukturen entdeckt, was auf das experimentell beobachtete Hystereseverhalten hindeutet.

Im Projekt **Weiterentwicklung des Pluto-Brenners** [8] 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 Erfahrungen des LTNT in Sachen Brennermodellierung sollen direkt in die notwendigen konstruktiven Modifikationen des Brenners betreffend Strömung und Wärmeübergängen einfließen. Die Simulationsrechnungen sollen auch die notwendigen Schritte in Richtung billigerer Produktion des Pluto-Brenners unterstützen.

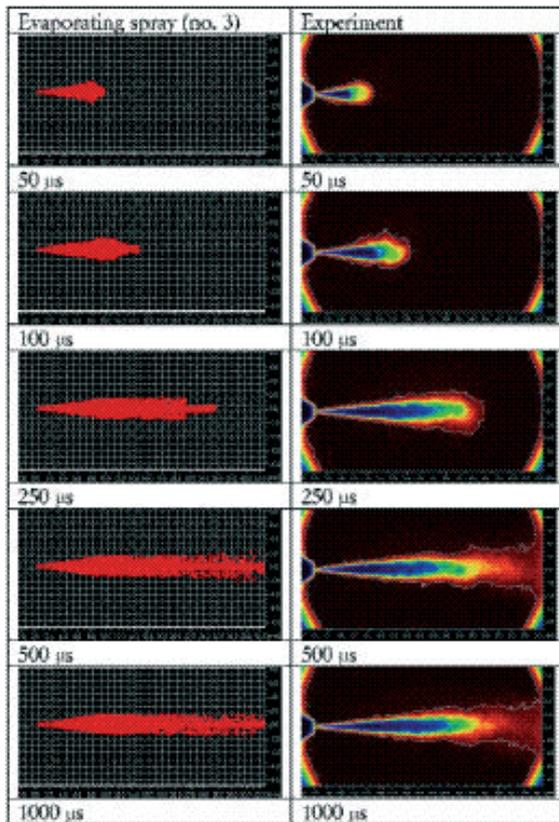
SCHADSTOFFREDUKTION UND -ASPEKTE

Für die Untersuchung der Verbrennungsmechanismen in einem Diesel-Motorzyklus 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. Im Gegensatz zu einem Diesel-Motor bleibt das Volumen, in dem sich die Flamme entwickelt, bei den PSI-Versuchen konstant (keine Kolbenbewegung). Realitätsnahe Messungen sind deshalb nur für eine kurze Zeit nach Einspritzbeginn möglich. Versuche an diesem Prüfstand bieten aber gegenüber Experimenten mit optisch zugänglichen Motoren den Vorteil, dass in dieser kritischen Phase störungsfrei gemessen werden kann als in einem Experimentiermotor, bei dem der optische Zugang geometrisch stark eingeschränkt ist, und die Fenster durch die notwendigen Schmiermittel nach wenigen Zyklen verschmutzt werden. Im Projekt **Investigation of Spray Combustion in Constant Volume Combustion Cell** [9] wurde die Ausbreitung von Diesel-Sprays (Eindringtiefe, Spraywinkel) bei verschiedenen Drücken und Temperaturen vermessen und mit Modellen verglichen. Durch Einsatz zweier bildverstärkter CCD-Kameras konnten mehrere Visualisierungen der Sprayausbreitung und Verbrennung durch Kombination von Chemilumineszenz- und Mie/Rayleigh-Laserlichtschnittverfahren realisiert werden (Fig. 3). Die mittlere Russpartikelgrösse in Sprayflammen konnte erstmals anhand des zeitlich aufgelösten LII-Signals und von Modellrechnungen zur Energiebilanz der Laser-aufgeheizten Russteilchen ermittelt werden.



Figur 4: Schattenbilder (SG), Chemilumineszenz (CL), Elastische Laser Streuung (LES) und Laser induzierte Incandescence (LII) Bilder, eine Millisekunde nach Einspritzbeginn.

Beim Dieselmotor ist die Gemischbildungsqualität für die homogene Kompressionszündverbrennung magerer Gemische von hoher Wichtigkeit. So werden tiefere Stickoxid- und Russemissionen erzielt. Im Projekt **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeits-Prozesse** [11] werden zündfähige, schwerverdampfende Kraftstoffe (meistens Dieseldestillate), die als Flüssigkeit in den Brennraum eingespritzt werden, numerisch und experimentell untersucht (Fig. 5).

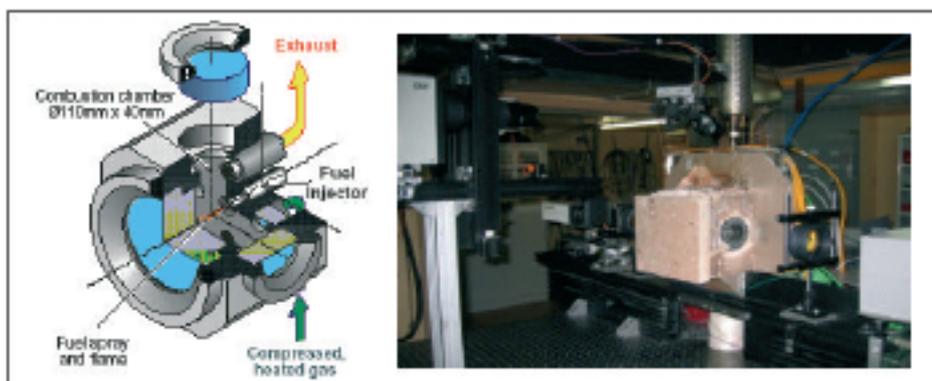


Figur 5: Sprayvisualisierung des gerechneten (links) und des gemessenen Falles (rechts)

Zur Beschreibung der physikalischen Prozesse vom flüssigen Zustand bis zur verdampften Phase müssen sowohl die Prozesse selber wie auch die Wechselwirkungen zwischen den zwei Phasen modelliert werden. Die durchgeführten Berechnungen wurden mit laboreigenen Messungen an einer optisch zugänglichen Hochtemperaturdruckzelle validiert. Es wurden Berechnungen mit n-Butan und n-Heptan als Kraftstoff durchgeführt. Zur Validierung wurden sowohl Daten aus der Literatur wie auch experimentelle motorische Daten der deutschen Forschungspartner herangezogen. Es zeigte sich, dass die Druckverläufe magerer homogener kompressionsgezündeter mit n-Butan betriebener Motoren verlässlich reproduziert werden konnten [31, 39].

Die Entwicklung neuer, energieeffizienter und schadstoffarmer dieselmotorischer Brennverfahren soll aufbauend auf den kürzlich am LAV abgeschlossenen Dissertationen im Projekt **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** [12] durch enge Verknüpfung von Experiment und numerischer Simulation weiter vorangetrieben werden. Die eng miteinander verknüpften Prozesse von Einspritzung, Aufbruch des Brennstoffstrahls und der entstehenden Tropfen, Verdampfung und Mischung von Luft und Brennstoff, Zündung und die nachfolgende Verbrennung werden genauer untersucht. Besonderes Gewicht wird auf das Verhalten von Diesel-Einspritzstrahlen im Hinblick auf die Zündorte, die Zündverzögerung und die Russentstehung während der Verbrennung gelegt.

Der experimentelle Teil des Projekts untersucht die bei der dieselmotorischen Verbrennung herrschenden Verhältnisse (Druck und Temperatur) mit Hilfe der HTDZ (Fig. 6) des LAV. Die Untersuchung von Dieseleinspritzstrahlen mit der Schlieren-Messtechnik macht die Ausbreitung des ver-



Figur 6: Die Hochtemperatur-Hochdruckzelle (HTDZ) des LAV

dampfenden Brennstoffs sichtbar. Bei der Modellierung (internationale Zusammenarbeit zwischen LAV und *University of Cambridge*, UK) der Zündverzugszeiten wurde eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung für die Fälle mit und ohne Grundturbulenz erreicht.

Im Projekt können Synergien mit einer parallel laufenden Zusammenarbeit des LAV mit der Firma *Wärtsilä* Schweiz genutzt werden. Die Resultate werden nicht nur für die Entwicklung neuer Brennverfahren, sondern auch neuer Injektoren und Einspritzsysteme von Bedeutung sein und sind somit auch für die auf diesem Gebiet sehr starke Schweizer Zulieferindustrie für die Automobilbranche von strategischem Interesse.

Nationale Zusammenarbeit

Das bisher geförderte Fachwissen ist 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 konzentriert. Die enge Zusammenarbeit dieser Institutionen mit Motorenherstellern in der Schweiz (*Liebherr Machines SA*, *Iveco* und *Wärtsilä NSD*) hat Tradition. Nicht zu unterschätzen ist auch die Zusammenarbeit der Hochschulen mit Industriepartnern aus der Zulieferindustrie der Automobilbranche wie *Kistler*, *Common Rail Technologies*, *Bosch*, u.a. Tradition hat auch die Zusammenarbeit des PSI und der ETH-Zürich mit der Firma *Alstom Power*, die in den letzten Jahren durch zusätzliche BFE-, KTI- und EU-Projekte verstärkt wurde.

Die folgenden vier umsetzungsnahen **KTI-Projekte** sind in das laufende BFE-Programm integriert, profitieren von den BFE-Vorleistungen und ergänzen die BFE-P+D-Projekte. Im Projekt **Modellierung und Auslegung eines CO₂ und NO_x freien Brenners für Alstom Power Gasturbinen** [24] sind die für Ende 2003 vorgesehenen Meilensteine – Katalysatorscreening und Berechnungsmodell – erreicht worden. Die Erkenntnisse aus dem Projekt **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brenner** [25] dienen der Verbesserung der laufenden Generation von *Alstom*-Gasturbinen. Im Projekt **Grundlagen**

der H₂-Reformat-Zumischung am Ottomotor [26] erarbeiten die HTA-Biel, das LAV und der Industrie-Partner *Robert Bosch GmbH* Beiträge zur weiteren Absenkung der Emissionen sowie zur Erhöhung des Wirkungsgrades im Teillastbereich des Ottomotors. Ziel der Partner LAV und *Kistler AG* im Projekt **Industrietaugliche Lichtwellenleiter-Messkette zur Bestimmung der Russmenge, der Russtemperatur und des Zündverzugs im Verbrennungsmotor** [27] ist die Realisierung einer Lichtwellenleiter-Sondenspitze, mit welcher im Brennraum kurbelwinkelaufgelöst gemessen werden kann. Damit können neue Einspritz- und Verbrennungsstrategien auch umgesetzt und letzten Endes in der nächsten Motorgeneration strengere Emissionsgrenzwerte erfüllt werden.

Der Vernetzung von Hochschulforschung mit den Fachhochschulen und der Privatwirtschaft diente die Tagung des **Schweizerischen Vereins für Verbrennungsforschung (SVV)** vom Oktober 2003, die unter dem Motto *Schadstoffminimierung bei Verbrennungssystemen* an der Fachhochschule Freiburg abgehalten wurde. Das Angebot des BFE anlässlich der SVV-Tagung 2001, sich vermehrt für Verlängerungen von Diplomarbeiten an Fachhochschulen zu engagieren, wurde im Berichtsjahr nur von der FH in Rapperswil mit dem Projekt **Adaptation eines DeNO_x-Systems auf verschiedene Fahrzeuge** [21] wahrgenommen.

Internationale Zusammenarbeit

Das Jahrestreffen der *European Research Community on Flow Turbulence and Combustion (ERCOFTAC)* www.ercoftac.org und des *Leonhard Euler Kompetenzzentrums für Messtechnik, Verbrennung und Schadstoffformation* wurde im Mai 2003 am PSI unter dem Motto: *Measuring Techniques, Combustion and Pollutant Formation* durchgeführt. ERCOFTAC finanzierte auch die Dissertation **Induced Global Unsteadiness**

and Sidewall Effects in the Backward-Facing Step Flow [29] am LAV.

Die Zusammenarbeit im Rahmen des **IEA-Implementing Agreements „Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion** www.im.na.cnr.it/IEA/ findet nach wie vor praktisch nur bilateral auf Eigeninitiative statt. Immerhin bietet das jährliche *Task Leaders Meeting*, das

im September 2003 in Faringdon, England durchgeführt wurde [35], unseren Forschern die Gelegenheit, ihre bestehenden Kontakte, u.a. mit dem *Sandia National Laboratory* (USA), dem *National Research Council* (Kanada) und insbesondere mit Japan weiter zu pflegen und auszubauen. Dem Wunsch des ExCo, das *Implementing Agreement* um fünf weitere Jahre zu verlängern, wurde seitens des CERT nicht stattgegeben und es wurde auf drei Jahre reduziert.

Äusserst erfolgreich verlief die seit 1997 jährlich an der ETHZ abgehaltene und vom BFE unterstützte Nanopartikel-Konferenz im August 2003. Unter der Leitung von A. Mayer (TTM Niederrohrdorf) teilten sich das LAV und die FH Aargau die Organisation. Etwa 250 Teilnehmer (neuer Rekord!) aus Europa, Nordamerika, dem fernen Osten und Australien nahmen an der Konferenz teil, um Erfahrungen und neues Wissen zu Russpartikeln aus der dieselmotorischen Verbrennung auszutauschen. Das BUWAL finanzierte die CD-Rom [36] mit den *Proceedings* und weiteren Informationen.

Die Ergebnisse des Projekts **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse** [11] fliessen

weiterhin in das internationale Forschungsprojekt **Homogene Dieselverbrennung** der *Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen* in Deutschland, ein. Die Forschungsvereinigung finanziert das LAV zusätzlich zum BFE.

Im Bereich der instationären Verbrennung wurde im März 2003 das Projekt **CRICE** (5. EU-Rahmenprogramm) mit Beteiligung des LAV, der *IVECO Motorenforschung AG*, Arbon, und vier weiteren europäischen Partnern erfolgreich abgeschlossen.

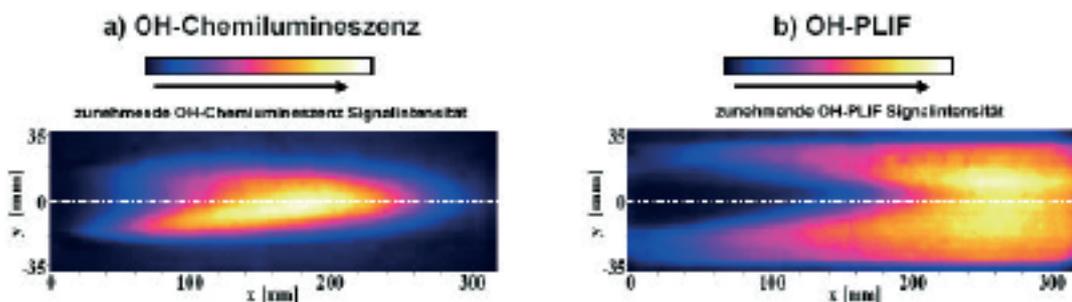
Im Rahmen des 6. EU-Rahmenprogramms befand sich Ende 2003 das grosse integrierte Projekt **HERCULES** in der Unterschreibungsphase. Das Projekt beschäftigt sich mit zukünftigen, energieeffizienten und umweltfreundlichen Antriebstechnologien für die Schifffahrt; beteiligt sind 40 Partner, darunter aus der Schweiz *Wärtsilä/CH*, *ABB Turbosystems*, das LAV, das PSI und die EMPA.

Die Institutionen des ETH-Bereichs arbeiten intensiv mit ausländischen Unternehmen zusammen. So bestehen gemeinsame Projekte mit *GM*, *VW*, *Opel*, *Renault*, *ALV Graz*, *Iveco Turin* und der *Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.* in Deutschland [30].

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die Ergebnisse des Projekts **Struktur- und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruckflammen** [13] sollen zu einer weiteren Optimierung der mageren Vormisch-Verbrennung für stationäre Gasturbinen im Hinblick auf einen höheren Gesamtwirkungsgrad und geringere Emissionen beitragen. Aufbauend auf das Vorgängerprojekt [2] konnte am Prüfstand (Fig.2) der Einfluss der Betriebs- und Turbulenzbedingungen auf die Wärmefreisetzung im Brennraum charakterisiert werden.

Innerhalb der untersuchten Betriebsparameter hat die Luftzahl den grössten Einfluss auf die Wärmefreisetzung. Eine Erhöhung der Luftzahl λ führt zu einer Stabilisierung der Flamme stromabwärts. Die räumliche Verteilung des Chemilumineszenz- und des OH-PLIF-Signals in Fig. 7 zeigen, dass sich unter den angegebenen Betriebs- und Turbulenzbedingungen stromab des Brennerkopfs eine v-förmige Flamme stabilisiert [34].



Figur 7: OH-Chemilumineszenz (a) und gemittelte OH-PLIF Aufnahme (b) bei Verwendung des Turbulenzgitters g350, xg10 (673 K, 14.4 bar, 40m/s, $\lambda = 2.0$).

Solche experimentellen Daten sind für die Validierung numerischer Flammenmodelle, die künftig zur Auslegung industrieller Gasturbinen eingesetzt werden, von grosser Bedeutung. Ein weiteres wichtiges Ziel ist die Ausweitung dieser Untersuchungen auf andere Brennstoff/Luftgemische, die sich hinsichtlich der Brenneigenschaften stark von CH_4 /Luftflammen unterscheiden. So sollen durch die Beimischung von H_2 , Gemische mit grösserer turbulenter Flammgeschwindigkeit untersucht werden. Damit kommt man in den Bereich von Bio-Brennstoffen bei denen im Hinblick auf die CO_2 Problematik ein höheres H/C Verhältnis angestrebt wird. Damit diese Forschungsergebnisse optimal umgesetzt werden, wird ab 2004 eine engere Zusammenarbeit mit *ALSTOM POWER* angestrebt.

Die PSI-Erfolgsgeschichte in der Entwicklung von Harnstoff-Entstickungsverfahren und neuartiger Beschichtungs-Katalysatoren für Dieselmotoren setzt sich fort. Die Ergebnisse des abgeschlossenen Projekts ***NO_x-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR*** [14] wurden sowohl an internationalen Tagungen präsentiert als auch in wissenschaftlichen Journalen publiziert [36, 41, 42]. Da im Jahr 2005 die deutlich strengere Abgasnorm EURO IV für Nutzfahrzeuge in Kraft treten wird, entwickelt die Industrie zur Zeit mit Nachdruck entsprechende Systeme zur Abgas-Nachbehandlung. Viele der daran arbeiteten Firmen haben deshalb mit dem PSI neue Forschungs Kooperationen abgeschlossen, sich beraten lassen oder Studien beim PSI in Auftrag gegeben. Durch einen Technologietransfer an die *Wacker AG* (Deutschland) wird das PSI-Know-how bei SCR-Katalysatoren für Dieselfahrzeuge auf den Markt gebracht. Bisher unbeantwortete Fragen der Harnstoff-SCR werden am PSI in einer von der *Wacker AG* finanzierten Dissertation untersucht, um noch bessere Hydrolyse-Katalysatoren zu entwickeln und damit noch kleinere SCR-Systeme zu realisieren. Erste Ergebnisse sind Erfolg versprechend. In einer zweiten von der Firma *Umicore* (ehemals *Degussa Autoabgaskatalyse*) finanzierten Dissertation werden alternative SCR-Katalysatoren untersucht und mit den herkömmlichen Zeolith-Systemen verglichen. Thema einer weiteren PSI-Dissertation ist der katalytische Russabbau in Dieselpartikelfiltern und die Entwicklung neuartiger Beschichtungs-Katalysatoren für Partikel.

Das Projekt ***Simulation eines 3-Zug-Kessels*** [15] der Firma *Ygnis* hat sich als gutes Beispiel erwiesen, wie das an der Hochschule erworbene Know-how gewinnbringend für eine industrielle Entwicklung eingesetzt werden kann. Die Zielset-

zung war, den *Ygnis-Kessel* so zu modifizieren, dass kaltes Rücklaufwasser aus dem Heizsystem ohne Vormischung in den Kessel eingespeist werden kann, ohne dass Kondensation eintritt. Basierend auf dem Grundverständnis, welches die Strömungssimulation im gesamten Kesselvolumen erbrachte, konnte eine einfache Lösung gefunden werden, welche die Anforderungen vollumfänglich erfüllte.

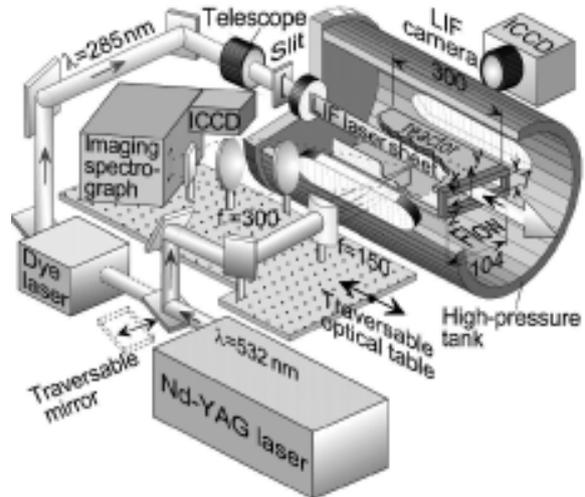
Die diesjährigen Arbeiten im LAV-Projekt ***Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO₂-Ausstoss*** [16] umfassten vor allem die Implementierung eines am LAV entwickelten Modells der Russbildung in der dieselmotorischen Verbrennung mittels 3-D Rechnung (*StarCD*). Da der neue *LIEBHERR*-Motor infolge Lieferungsverzögerung noch nicht zur Verfügung stand, wurden die Simulationen mit einem 1-Zylinder 1-Liter *Medium Duty Common Rail* Dieselmotor durchgeführt. Die ersten Resultate sehen zwar ermutigend aus, müssen aber als vorläufig betrachtet werden, da entsprechende Messdaten, welche die räumliche Verteilung wiedergeben, noch nicht vorhanden sind. Jedoch sind die Emissionen beim Auslass-Öffnen in guter Übereinstimmung mit den Resultaten aus dem 0-D-Simulationstool, für welches das Russmodell ursprünglich entwickelt wurde und ebenfalls mit den Emissionsdaten aus den Messungen im Auslasssystem des Motors. Der neue *LIEBHERR*-Vierzylinder-Motor mit Viertilkopf, Pumpe-Leitungs-Düse, Einspritzsystem und interner Abgasrückführung (D 934L, erfüllt die *off-road* Emissionsstufe TIER 3 $\text{NO}_x+\text{HC}=4$ g/kWh, $\text{PM}=0.2$ g/kWh) wird voraussichtlich Ende Mai 2004 auf dem Prüfstand des LAV laufen. Es soll eine Bestandesaufnahme gemacht werden, welche das Potential des für die *Tier 3-Abgasnorm* zertifizierten Motors bezüglich der kommenden Norm *Tier 4* aufzeigen soll. Dabei werden Variationen von AGR – Technik, Aufladung, Injektoren (Geometrie), Ventilsteuerzeiten (Nockenwellenprofil), Brennraum (Form der Kolbenmulde) und Einspritzverlauf in Betracht gezogen [31,40]. Im Bereich der Messtechnik und Abgasanalytik wird mit der EMPA zusammengearbeitet.

Ziel des LAV-Projekts ***Massnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus*** [17] ist die Darstellung eines neuen PKW-Antriebs, der bei vollem Potential zur Erfüllung von Nullemissionsstandards (bezogen auf CO , UHC, NO_x , Russ), eine spezifische CO_2 -Reduktion um 25 % gegenüber dem heutigen Stand der Technik aufweist. Es wird dabei von herkömmlichen Treibstoffen wie Benzin, Erdgas

und Diesel (bei letzterem ist die Nullemissions-Tauglichkeit jedoch noch nicht gegeben) ausgegangen, womit Infrastrukturprobleme betreffend Kraftstoffversorgung wie beispielsweise bei Erdgas und Wasserstoff vermieden werden können.

Das LTNT-Projekt: **Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner** [18] soll wichtige Beiträge zur weiteren Optimierung der mageren Vormischverbrennung für stationäre Gasturbinen liefern. Projektziel ist die Weiterentwicklung des am LTNT vorhandenen instationären Flamelet-Modells. Dieses soll den für Gasturbinen interessanten Bereich zwischen Diffusions- und teilvorgemischter Verbrennung besser simulieren. Die bisher erhaltenen Resultate sind ermutigend, es müssen aber am Modell weitere Verbesserungen vorgenommen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse werden direkt in die Entwicklung der nächsten Generation von schadstoffarmen Gasturbinen beim Industriepartner Alstom Power einfließen.

Im PSI-Projekt **Partial Catalytic Oxidation Processes for Power Generation Application** [19] wird in Zusammenarbeit mit Alstom Power 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 Verbrennungs-Verfahren dar, da sie auf grundsätzlich neuen Brennstoff-Umwandlungsverfahren basieren. Im Berichtsjahr wurde die partielle katalytische Oxidation von CH_4 zu Synthesegas über Rh/ZrO_2 experimentell und numerisch untersucht. Dabei handelte es sich um Gemische mit einem Brennstoff-zu-Luft Verhältnis von $\phi = 2.5$ und $\phi = 4.0$ bei einem Druck von 4 respektive 6 bar. Die Experimente wurden in einer optisch-zugänglichen, katalytischen Brennkammer im Labor-Massstab durchgeführt (Fig. 8). Eindimensionale Raman-Spektroskopie lieferte die transienten Konzentrationen der Hauptspezies (CH_4 , O_2 , H_2O , CO_2 , H_2 , CO und N_2).



Figur 8: Schematische Darstellung des optisch zugänglichen, katalytischen Hochdruck Kanalreaktors und des Raman/OH-LIF set ups.

Für die numerische Berechnung wurde ein elliptisches, zweidimensionales Simulationsprogramm verwendet, welches detaillierte Reaktionsmechanismen für die katalytischen Prozesse (heterogen) und für die Gasphase (homogen) beinhaltet. Letztere konnten anhand einer im Experiment auftretenden Zündung in der Gasphase validiert werden, wodurch ebenfalls der Bereich im Reaktor mit vernachlässigbarer Kinetik der Gasphase identifiziert wurde.

Im Projekt **Heissgas-Motor** [20] klärt die Firma awtec AG das thermodynamische Verbesserungspotenzial des herkömmlichen Dampfmaschinen-Prozesses bei Einsatz der Direktverdampfer-Technologie ab. Dieser neue Prozess wurde als reiner Gasprozess mit interner Verbrennung und als reiner Dampfkessel mit einer äusseren Wärmezufuhr modelliert. Mit dem Aufzeigen möglicher thermodynamischer Lösungsstrategien wurde das Projekt abgeschlossen.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Die für das Berichtsjahr vorgesehenen Ziele des Programms sind fast alle erreicht worden. Dabei konnte die Qualität und Kontinuität in den Projekten aufrecht erhalten werden. Die Umsetzung der Forschungsergebnisse ist durch die Zusammenarbeit mit mehr als einem Dutzend grossen Industriepartnern gewährleistet.

Mit der Unterstützung von 5 im Berichtsjahr abgeschlossenen Dissertationen (wovon vier beim

LAV [30 – 33]) wurde der Ausbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs weiterhin Rechnung getragen. Ausserdem erhielt K. Hermann Anfang 2003 für seine Dissertation am [43] die ETH-Medaille für *outstanding dissertations* (dies ist die vierte Medaille im Programm seit 1996).

Der im Jahr 2001 begonnene Prozess, die Fachhochschulen untereinander und mit den Hochschulaktivitäten (ETHZ, ETHL und PSI) zu vernet-

zen, geht nur schleppend voran. Für 2004 ist ein neuer Anlauf geplant.

Das Strategiepapier zur künftigen Förderung der Verbrennungsforschung z.Hd. der BFE-Geschäftsleitung [22] liegt nun vor und wird in das Programm 2004 – 2007 z. Hd. der CORE einfließen. Die Darstellung des Programms Verbrennung unter www.energie-schweiz.ch musste aus Zeitgründen auf 2004 verschoben werden.

Neben den festgelegten Projektzielen sollen folgende Punkte zur Durchführung gelangen:

- Das Forschungsprogramm **Feuerung und Verbrennung 2004 – 2007** [37] und entsprechende *Roadmaps* zuhanden der CORE sind auszuarbeiten. Darin wird auch die Konkretisierung des *Near-Zero-Emission* Ziels für Verbrennungskraftmaschinen sichtbar werden. Dazu wird das **Strategiepapier Verbrennungsforschung** [22] eine Basis liefern.
- Der weitere Einbezug der Fachhochschulen ins Programm soll gefördert und entsprechende Netzwerke sollen definiert werden, z.B. ein

gasturbinenorientiertes Netzwerk zusammen mit *Alstom Power*.

- Die SVV-Tagung 2004 wird in Baden Dättwil abgehalten werden.
- Das Programm *Feuerung und Verbrennung* soll im Internet dargestellt werden.
- Die gut abgestimmte Förderung von BFE, KTI und Industrie [24 - 27] soll wegen der drastischen BFE-Budgetreduktionen im P+D-Bereich verstärkt werden.
- 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).

Punkt Umsetzung ist das LAV gefordert: Nach einer ersten Anschubfinanzierung seitens des BFE beschloss VW, das LAV mit einem neuen Projekt betreffend **Massnahmen zur CO₂-Reduktion in PKW-Antrieben** mit Start im Jahr 2004 zu beauftragen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

- [1] C. Frouzakis (frouzakis@lav.mavt.ethz.ch) et al. LAV/ETH-Zürich: **Turbulente, chemisch reaktive Strömung in Motoren Brennräumen** (SB).
- [2] P. Griebel (peter.griebel@psi.ch), PSI-Villigen: **Struktur turbulenter Vormischflammen unter Hochdruck** (SB).
- [3] T. Gerber et al., (thomas.gerber@psi.ch): PSI-Villigen: **Verbrennungsreaktionen in Gegenwart sauerstoffhaltiger Brennstoffe** (JB).
- [4] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et. al.: **Quantitative Laser Induced Fluorescence in Combustion** (JB).
- [5] A. Prospero und L. Blum (juerg.gass@ethz.ch), LTNT/ETH-Zürich: **Experiment turbulente Gegenstromflamme** (JB).
- [6] R. Jeltsch (rolf.jeltsch@ethz.ch) et al., SAM/ETH-Zürich: **Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung** (JB).
- [7] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Direkte numerische Simulation der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen** (ZB), ENET 230215.
- [8] S. Baykal und J. Gass (juerg.gass@ethz.ch), LTNT/ETH-Zürich: **Weiterentwicklung des Pluto-Brenners** (JB).
- [9] T. Gerber (thomas.gerber@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Investigation of Spray combustion in Constant Volume Combustion Cell** (JB).
- [10] S. Kunte (stefan.kunte@psi.ch) et al., LAV/ETH-Zürich: **Modellierung und Validierung von reaktiven, instationären 2-Phasenströmungen** (JB).

- [11] G. Barroso und K. Boulouchos (boulouchos@lw.iet.mavt.ethz.ch) et al., LAV/ETH-Zürich: **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse** (JB), ENET 230219.
- [12] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** (ZB), ENET 230216.

Liste der P+D-Projekte

- [13] P. Griebel (peter.griebel@psi.ch), PSI-Villigen: **Struktur- und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruckflammen** (JB).
- [14] M. Koebel (manfred.koebel@psi.ch), PSI-Villigen: **NO_x-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR** (SB).
- [15] J. Gass (juerg.gass@ethz.ch) et al. LTNT/ETH-Zürich: **CFD-Simulation Dreizugkessel** (JB).
- [16] 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), ENET 230217.
- [17] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Massnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** (JB).
- [18] J. Gass (juerg.gass@ethz.ch) et al. LTNT/ETH-Zürich: **Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner**.
- [19] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Partial Catalytic Oxidation Processes for Power Generation Application**.
- [20] M. Illien (andreas.schlegel@awtec.ch), awtec AG, Zürich: **Heissgas-Motor** (SB).
- [21] R. Bunge (rainer.bunge@hsr.ch), HSR-Rapperswil: **Adaptation eines DeNO_x-Systems auf verschiedene Fahrzeuge** (SB).
- [22] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Strategiepapier Verbrennungsforschung** (SB).
- [23] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Umwandlungseffizienz von Brennstoffzellen und Verbrennungskraftmaschinen für die stationäre, dezentrale Energieversorgung** (JB).
- [24] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Modellierung und Auslegung eines CO₂ und NO_x freien Brenners für Alstom Power Gasturbinen**.
- [25] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brennern**.
- [26] J. Czerwinski, (jan.czerwinski@hta-bi.bfh.ch), HTA Biel: **Grundlagen der H₂-Reformat-zumischung am Ottomotor**.
- [27] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Industrietaugliche Lichtwellenleiter-Messkette zur Bestimmung der Russmenge, der Russtemperatur und des Zündverzugs im Verbrennungsmotor**.
- [28] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: **Totale Wirkungsgrad-Vergleiche aktueller Brennstoffzellensysteme mit dem Swissmotor** (SB).

Referenzen

- [29] N. Tylli; **Induced Global Unsteadiness and Sidewall Effects in the Backward-facing Step Flow: Experiments and Numerical Simulations**, Dissertation ETH-Zürich Nr. 15913, 2003, ENET 230119.
- [30] T. Koch; **Numerischer Beitrag zur Charakterisierung und Vorausberechnung in einem direkteingespritzten strahlgeführten Ottomotor**, Dissertation ETH-Zürich Nr. 14937, 2003, ENET 220343.
- [31] B. Schneider, **Experimentelle Untersuchungen zur Spraystruktur in transienten, verdampfenden und nicht verdampfenden Brennstoffstrahlen unter Hochdruck**, Dissertation, ETH-Zürich, Nr. 15004, 2003, ENET 230118.
- [32] A. Bertola; **Technologies for Lowest NO_x and Particulate Emissions in DI-Diesel Engine Combustion - Influence of Injection Parameters, EGR and Fuel Composition**, ETH – Dissertation Nr. 15373, ETH-Zürich, 2003.
- [33] Ch. Schär; **Control of a Selective Catalytic Reduction Process**, Dissertation ETH-Zürich Nr. 15221, 2003.
- [34] P. Griebel et. al.: **Flow Field and Structure of Turbulent High-Pressure Premixed Methane/Air Flames: Proceedings of ASME Turbo Expo 2003, Atlanta, USA**, ENET 230102.
- [35] G. B. Dummond, Ed.: **XXIV Task-Leaders-Meeting, Proc. IEA-Conf. Faringdon, UK, September 2003**.
- [36] A. Mayer, TTM (ttm.a.mayer@bluewin.ch), Ed., **Proc. 7th ETH-Conference on Combustion generated Nanoparticles, August 2003**.
- [37] A. Hintermann: **Forschungsprogramm Feuerung und Verbrennung 2004-2007**.
- [38] C. Frouzakis et. al.: **Numerical and Experimental Study of non-premixed Flame Transitions in Opposed Jet-Burners: Proceedings of the 3rd Meeting of the Greek Section of the Combustion Institute, Patras 2003**.
- [39] G. Barroso et. al.: **An Extensive Parametric Study on Diesel Spray Simulation and Verification with Experimental Data**, Society of Automotive Engineering, SAE 2003-01-3230, 2003.
- [40] A. Bertola, R. Li, K. Boulouchos: **Influence of Water-in-Diesel-Emulsions and EGR on Combustion and Exhaust Emissions of Heavy Duty DI-Diesel Engines equipped with Common-Rail Injection Systems**, SAE 2003-01-3146, 2003.
- [41] O. Kröcher: **NO_x Reduction in the Exhaust of Mobile Heavy-Duty Diesel Engines by Urea-SCR** 6th International Congress on Catalysis and Automotive Pollution Control (CAPoC6), Brüssel, Belgien, 22-24. Oktober 2003.
- [42] M. Elsener, et. al.: **Aufbau und Vermessung eines DeNO_x-Systems auf der Basis von Harnstoff-SCR**, MTZ 11, 966-971 (2003).
- [43] K. Herrmann, **Strömung, Flammencharakterisierung und Stickoxid-Bildung in turbulenten Vormischflammen**, Dissertation ETH-Zürich, Nr. 14552, 2002.

BRENNSTOFFZELLEN

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Alphons Hintermann, Otto Haas

alphons.hintermann@bfe.admin.ch, otto.haas@psi.ch



Testfahrt des Brennstoffzellenboots Hydroxy 3000.

Dieses vom BFE sowie von *Les Electriciens Romand* und *Romande Energie* an der FH-Yverdon (EIVD) unterstützte Projekt wurde in Zusammenarbeit mit dem Schiffbauer *MWLINE*, der FH-Biel und dem PSI durchgeführt.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Der umweltschonende Energieumwandlungsprozess mit hohem Wirkungsgrad der Brennstoffzellen-Technologie ist die Motivation für das vom BFE mitfinanzierte und koordinierte *Brennstoffzellen-Programm*. Das Programm soll in der Schweiz Kompetenzen zur Erforschung, Weiterentwicklung und Umsetzung der Brennstoffzellen-Technologie fördern und vernetzen. Innovation und international anerkannte Qualität in Forschung und Entwicklung soll dabei der Massstab sein.

Für verschiedene Brennstoffzellentypen, hat sich in der Schweiz in den letzten fünfzehn Jahren eine beachtliche Kompetenz auf verschiedensten Ebenen – von den Grundlagen bis hin zum kurz bevorstehenden Markteintritt – etabliert. Schwerpunktmässig gefördert werden hingegen nur die Polymer-Elektrolyt-Membran- (PEM) sowie die Solide-Oxide-Brennstoffzellen-Technologie (SOFC).

Das Paul Scherrer Institut (PSI) ist seit vielen Jahren auf dem Gebiet der Wasserstoff/Methanol-Brennstoffzellen-Technologie tätig. Das Schweizer PEM-Programm baut auf der PSI-Technologie

auf. Diese wurde in den letzten Jahren zusammen mit der ETH-Zürich punkto Fertigungstechnik und Verbilligung der Produktionskosten weiterentwickelt (*PowerPac*-Technologie). Mit dem Know-how-Transfer vom PSI und der ETH-Zürich an die FH-Biel wurde ein neuer Standort der PEM-Technologie mit Schwerpunkt Umsetzung in der Privatwirtschaft geschaffen.

Die SOFC-Forschung wird vor allem an der ETH-Zürich, ETH-Lausanne und der EMPA betrieben. Die FH-Winterthur hat mit ihren Simulationsaktivitäten zur Weiterentwicklung der *Sulzer HEXIS*-Technologie beigetragen. Um die Start-up Firma *HTceramix* ist an der ETH-Lausanne ein neuer SOFC Schwerpunkt entstanden.

Bei den Forschungsarbeiten stehen sowohl bei der PEM- als auch bei der SOFC-Technologie die Steigerung des Wirkungsgrades bei hohen Leistungen und die Entwicklung kostengünstigerer Komponenten sowie technologiespezifische Fragen im Vordergrund.

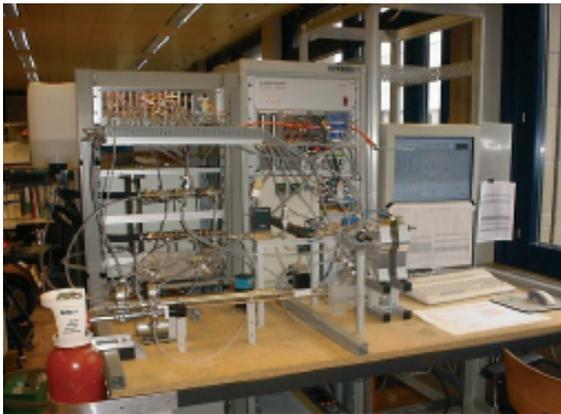
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

WASSERSTOFF- UND METHANOL-PEM-BRENNSTOFFZELLEN

Im Projekt ***Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H₂ oder Methanol als Brennstoff*** [1] wurden die Entwicklungen von in-situ Diagnosemethoden sowie von billigeren und wirkungsvolleren Katalysatoren weitergeführt. Die Herstellung von strahlengefropften Membranen mit optimaler Ionenleitfähigkeit und minimaler Brennstoffdurchlässigkeit ist ein weiterer Projektbestandteil. Im Berichtsjahr wurden grundlegende Untersuchungen zur Wasserstoffadsorption auf Pt-Katalysatoren an mikrostrukturierten Modellelektroden durchgeführt sowie oxidische Katalysatoren z.B. Bi₂Pt_xIr_yO₇ für die Sauerstoff-Reduktion getestet. Diese Katalysatoren zeigen auch eine hohe Methanoltoleranz, was für die Direkt-Methanol-Brennstoffzellen von Interesse ist. Zum Thema Membranentwicklung konnte gezeigt werden, dass der Grenzfläche Membran/Gasdiffusionselektrode eine grosse Bedeutung zukommt. Diese Arbeiten führten zu einer Patentanmeldung. Durch Segmentieren von Elektroden wurden in-situ örtlich aufgelöste Impedanzmessungen durchgeführt. Mit Neutronenradiographie konnte der Wasser-

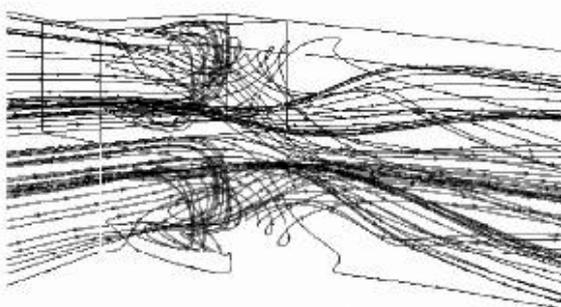
anteil in der Gasdiffusionsschicht bestimmt werden. Die Entwicklung dieser beiden in-situ Charakterisierungsmethoden ist eine Pionierleistung des PSI, die sich offensichtlich gelohnt hat.

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. Ein Brennstoffzellenteststand (Fig. 1) wurde mit einem vom PSI gelieferten Brennstoffzellenstack bestückt. Der Stack wurde auf Wasserkühlung umgestellt und mit einem Luftbefeuchter und zusätzlichen Temperaturfühlern versehen. Mit der neu erstellten Software für die Datenerfassung und dem Kontrollsystem kann der Teststand nun zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Brennstoffzellensystemen eingesetzt werden. Die Modellierung der Teilsysteme konzentrierte sich auf die Aktivitätsverluste der Elektroden, die Vorgänge im Luftdruckbehälter und im Kühlsystem sowie auf das Wasserstoff-Rezirkulationssystem.



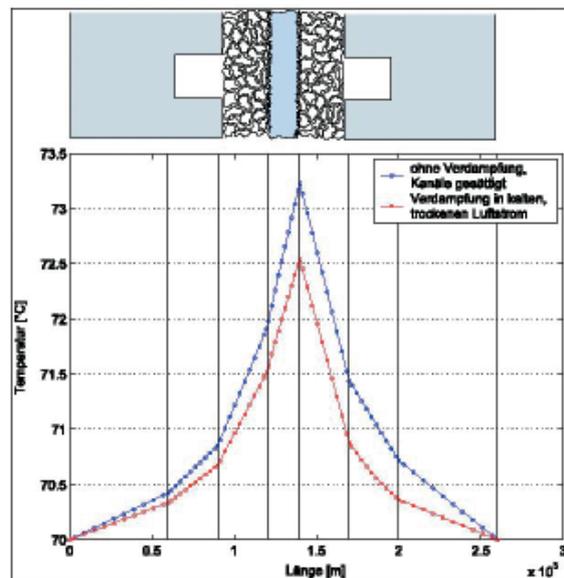
Figur 1: Brennstoffzellen-Teststand installiert an der EPFL, Laboratoire d'Electronique Industrielle

Ziel des Projekts **Novel Concepts for High-Performance Polymer Electrolyte Fuel Cells** [3] ist die dreidimensionale mathematische Beschreibung von Transportvorgängen und der Gasversorgung in PEM-Brennstoffzellen. Durch die Modellierung verschiedenartiger Gasverteilungssysteme sollen aussichtsreiche, neuartige Systeme ermittelt und anschließend experimentell validiert werden. Zur Modellierung wurde die *Finite Volume Method* benutzt. Bei den Berechnungen wurden auch der Diffusionsvorgang in den Poren vor der Aktivschicht, verschiedenartig gestaltete Kühlsysteme und die Temperaturverteilung in den Zellen mitberücksichtigt sowie deren Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit der Brennstoff-Zellen untersucht. Die Rechnungen zeigen, dass ein verästelttes Mikrokanalsystem zu besseren Resultaten führen könnte als die konventionellen Kühlsysteme mit serpentine- und mäanderartig angelegten Kühlkanälen. Gewisse Resultate konnten mit publizierten experimentellen Werten vom *Los Alamos National Laboratory* validiert werden. Fig. 2 zeigt, wie bei den Verästelungen eine laminare Durchmischung stattfindet.



Figur 2: Die Strömungslinien zeigen eine laminare Durchmischung bei den Verästelungen.

Das PSI entwickelt zusammen mit der Zürcher Hochschule Winterthur (ZHW) im Projekt **Numerische Modellierung von PEM-Brennstoffzellen** [4] einfache numerische Modelle zur Berechnung von Stromdichte-, Partialdruck- und Temperaturverteilung in technischen Zellen. In einem ersten Schritt wurde mit Hilfe der stationären Transportgleichung die Temperaturverteilung im Zellenquerschnitt berechnet und der Einfluss der Gasfeuchte und Gastemperatur am Eingang auf die Temperatur-Verteilung in den Zellen berechnet (Fig. 3). Als Wärmequelle in der Zelle wirkt vor allem die Reaktionswärme, welche in der dünnen Reaktionsschicht an der Kathode freigesetzt wird. Die Temperaturüberhöhung an dieser Stelle beträgt je nach Stromdichte maximal etwa 4.5°C mit befeuchteter Luft und etwa 3.5°C mit trockener Luft. Die Verdampfungswärme, hilft die Temperaturüberhöhung zu reduzieren. Das Modell muss nun noch mit der elektrochemischen Reaktionskinetik und deren Auswirkung auf die Wärmeentwicklung bei verschiedenen Stromstärken ergänzt werden.



Figur 3: Einfluss der Gasfeuchte auf die Temperaturverteilung in den einzelnen Bipolarzellen

ERDGAS-SOFC-BRENNSTOFFZELLEN

Im Projekt **Intermediate Temperature Fuel Cells Based on Ceramic Proton Conducting Electrolytes** [5] wird eine neue Generation von Brennstoffzellen erforscht, welche protonenleitenden keramische Membranen als Elektrolyten verwenden. Die protonenleitende Keramik soll für Temperaturen zwischen 300° und 700°C funktionieren und einen internen Brennstoffreformierprozess erlauben. Ein Doktorand und Prof. Stim-

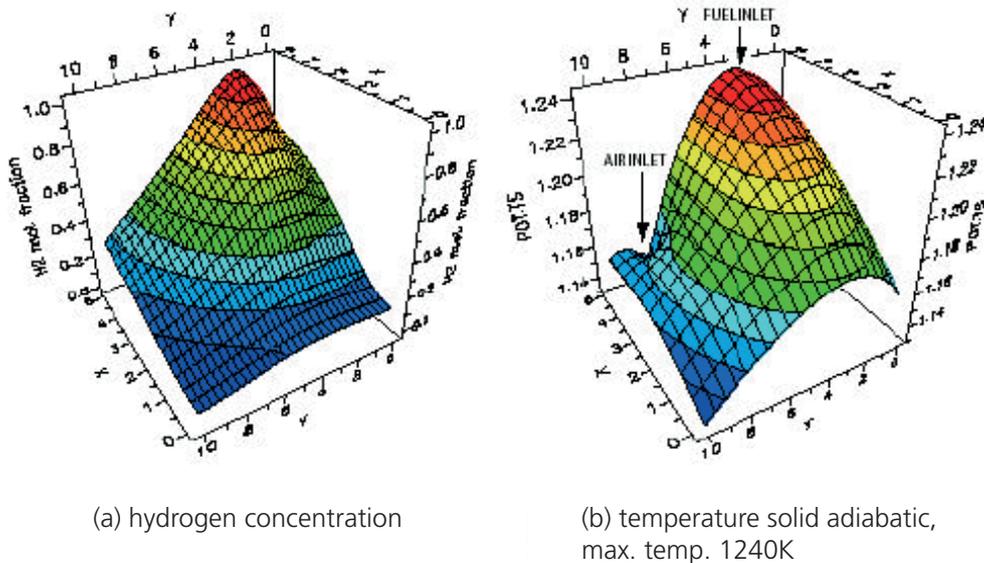
ming der TU München konnten als sein Betreuer engagiert werden. Zuerst wird die Machbarkeit dieser Brennstoffzelle mit $\text{BaCe}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_3$ Perovskit als Hochtemperatur-Protonenleiter getestet.

Ziel des Process-Engineering Projekts **Production Oriented Process Engineering for Establishing Reliable SOFC Cell and Stack Manufacturing** [6] ist es, den in der Firma *HTceramics* entwickelte, kostengünstige SOFC-Produktionsprozess im Pilotmasstab (200 Zellen/Woche) so zu optimieren, dass Produkte mit einheitlicher Qualität hergestellt werden können. Um Produktionspannen zu lokalisieren und auszumerzen wurde der heutige Produktionsprozess von einem erfahrenen Prozessingenieur analysiert. Dabei wurde der Prozess mit einem Flussdiagramm beschrieben, die einzelnen Prozesse standardisiert, die einzelnen Ansätze mit einem *Product batch identity sheet* registriert und die verschiedenen Ansätze miteinander verglichen. Dieser Ansatz zeigte, dass vor allem die Qualität der Ausgangsmaterialien genauer spezifiziert werden muss und die Lieferanten zur Einhaltung dieser Spezifikationen angehalten werden müssen, um die Reproduzierbarkeit der Zellen zu gewährleisten. Der nächste Schritt wird nun die Implementierung eines Qualitäts- und Prozesskontrollsystems sein, ein notwendiger Schritt für die nächste *scale-up* Phase.

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. In einem Langzeittest wurden Einzel-

zellen beobachtet, um die Degradation der Leistung zu evaluieren. Dabei wurden verschiedene kommerzielle Stähle als Interconnectmaterialien zwischen den einzelnen Zellen getestet. Gewisse Stähle zeigten bei diesen Tests wesentlich bessere Eigenschaften (kleinere Widerstandszunahme) als die bisher verwendeten. Es wurden auch Langzeit-Tests von Einzelzellen bis zu 5000 h durchgeführt um die Degradationseigenschaften abzuklären. Dabei wurde auch der Einfluss von Temperaturzyklen evaluiert. Ziel des Vorhabens ist unter anderem, aus Experimenten mit einzelnen Zellen das Verhalten von ganzen Stapeln zu prognostizieren, um das System als Ganzes optimieren zu können. *post-mortem*-Analysen sollen zu weiteren Erkenntnissen führen. Durch Modellierung wurden Wasserstoffkonzentrationsprofile und Temperaturprofile berechnet (Fig. 4).

Energy Integration and Fuel Cell Systems [8] ist ein Projekt, in dem die Energieflüsse in PEMFC und SOFC charakterisiert und die totalen Kosten des ganzen Brennstoffzellensystems erfasst und optimiert werden sollen. Dabei werden die Brennstoffprozesse vor der Brennstoffzelle, im Brennstoffzellenstapel und nach dem Stapel thermodynamisch charakterisiert, die elektrischen, mechanischen und thermischen Energieflüsse und Materialflüsse bestimmt sowie die Kosten der Teilsysteme und des ganzen Systems abgeschätzt. Die Daten werden dann mit einem *Multi-Objective-Optimizer*-Programm optimiert. Erste Resultate dieser Prozessintegrationstechnik wurden im *Journal of Power Sources* publiziert [25].



Figur 4: Wasserstoffkonzentrationsprofile und Temperaturprofil bei einem Strom von 28 A und einer 70% Brennstoffausnutzung.

Im Projekt **Startphase OneBat** [9] wurden Vorarbeiten zur Machbarkeit einer Mikro-SOFC durchgeführt. Die grundsätzlichen Überlegungen zum Design und zur Materialwahl ermutigten zu detaillierteren Abklärungen in unterschiedlichen Bereichen. Die Ergebnisse der 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] werden im Jahr 2004 in einen grösseren KTI-Projektantrag einfließen, mit dem Ziel *proof of concept* einer Mikro-SOFC.

Nationale Zusammenarbeit

Das BFE organisierte zusammen mit dem PSI im Februar 2003 eine Veranstaltung mit dem Titel **Brennstoffzellen Networking Schweiz** durch. Die verschiedenen Arbeitsgruppen stellten ihre Aktivitäten, ihre Laborausrüstungen, usw. vor. Dabei konnten sich die Arbeitsgruppen auf dem Gebiet der Brennstoffzellen besser kennen lernen. Die abgegebenen Factsheets (1 Seite pro Gruppe) bilden eine gute Basis für einen künftigen **Brennstoffzellen-Atlas Schweiz** [24, 28]. Zwecks Vertiefung der Kontakte veranlasste das BFE im Mai 2003 ein zweitägiges Treffen an der FH in Yverdon, an dem alle Forschergruppen ihre laufenden Arbeiten vorstellten. Beide Veranstaltungen boten ausgiebig Gelegenheit, gemeinsame Probleme zu besprechen und neue Zusammenarbeiten zu initiieren.

Zum effizienten Networking ist der Auftritt der Programms **Brennstoffzellen** auf der BFE-Webseite wichtig. Um einen einheitlichen Web-Auftritt aller BFE-Energieforschungsprogramme zu erreichen, wurde das Projekt **Struktur BFE-Webseite Brennstoffzellen** [25] gestartet.

Der Technologietransfer wird von der Programmleitung aktiv unterstützt. Zur besseren Umsetzung der Forschung auf dem Gebiet der PEM-Brennstoffzellen-Technologie wurde im Zusammenhang mit dem **PowerPac**-Projekt [18], eine Lead-Partner-Suche von der Firma **TEMAS AG** im Projekt: **Umsetzung der PEM-Technologie** [26] durchgeführt. Zunächst wurden die vorhandenen Informationen über das **PowerPac** auf einem ansprechenden Factsheet dargestellt. In der Folge

wurden einige Schweizer Firmen kontaktiert und interessante Gespräche geführt, was zur Unterzeichnung von Geheimhaltungserklärungen mit Systemintegratoren führte. Der Durchbruch ist jedoch noch nicht erreicht und wird für die Entscheidungsfindung bei den Industriepartnern noch einige Zeit erfordern. Für ein marktreifes Produkt sind jedoch noch weitere Entwicklungsschritte in Richtung Produkt und Prozess-Engineering nötig. Nur mit einem industriellen Partner, der in die **PowerPac**-Technologie investiert und den Lead übernehmen will, wird dies gelingen.

Die im August 2000 in Birsfelden bei der **Alternativ-Energie Birsfelden AG** in Betrieb genommene **Phosphorsäure-Brennstoffzelle vom Typ ONSI PC 25 C** (200 kW_{el}) erreichte bis Ende 2003 bereits 26'778 Betriebsstunden. Der durchschnittliche elektrische Wirkungsgrad betrug 39.5% (Berechnet auf der Basis der am Eintritt der Anlage über die gesamte Betriebszeit gemessenen Erdgaszufuhr und der von der Anlage effektiv ans öffentliche Stromnetz abgegebene Strommengen. Stillstandsverluste etc. sind darin enthalten.). Die Verfügbarkeit der Anlage war hoch, die Anzahl Betriebsstörungen mit automatischer Abschaltung gering und es mussten keine grösseren Komponenten oder Bestandteile der Brennstoffzelle ersetzt werden. Von der maximalen Abwärmeleistung von 220 kW können ca. 175 kW im Fernwärmenetz genutzt werden. Die Anlage ist praxistgerecht und publikumswirksam auf einem Schulhof mit hoher Fussgängerfrequenz aufgestellt. Die Akzeptanz ist sehr gut.

Internationale Zusammenarbeit

Aufgrund einer Initiative der europäischen Kommission ist die **Hydrogen/Fuel Cell Technology Platform** im Aufbau begriffen und hat Ende 2003 erstmals getagt. Die Schweiz wird in der zu konsultierenden Mirror Group vertreten sein und an

den Forschungsarbeiten aktiv teilnehmen. Es bestehen gute Aussichten, dass die mit Schweizer Beteiligung im Rahmen des 6. Rahmenprogramms eingegebenen Projektanträge **Real SOFC (Integrated Project)** bewilligt werden. Die Schweiz ist

auch im **Network of Excellence SOFCNET** (5. Rahmenprogramm) beteiligt, das im Januar 2003 gestartet wurde.

Internationale Messen bilden eine gute Plattform, neue Produkte zu positionieren. Anlässlich der Hannover Messe 2003 stellten *Sulzer Hexis* und *MEA-DEA* ihre Prototypen vor. Das *PowerPac*-Team war ebenfalls mit einem Stand vertreten und stellte sein Funktionsmuster dem Publikum vor. Es konnte wertvolle Kontakte mit Firmen knüpfen, welche die *PowerPac*-Technologie weiterentwickeln möchten.

Die Strategie des **IEA-Implementing Agreements Advanced Fuel Cells**, das drei technologie- und zwei anwendungsorientierte Annexe umfasst, ist auf Informationsmanagement und Koordination fokussiert. Die Schweiz macht in den Annexen über *Solid Oxide Fuel Cells* mit.

Ziel des **IEA Annex Stationäre Brennstoffzellen** [32] ist das Erkennen der Rahmenbedingungen und Voraussetzungen für den Einsatz und die Verbreitung von stationären Brennstoffzellen in Energieversorgungssystemen in verschiedenen Ländern. Der Einsatz von kleinen stationären Brennstoffzellen in Wohngebäuden wird vorwiegend in Deutschland und den USA getestet. Neben der Verbesserung der Produkte (Standfestigkeit, Kosten) werden vor allem die technischen Rahmenbedingungen untersucht. Um die im Wohnbereich typischen kurzen Strombedarfsspitzen abzudecken, wird der Einsatz von Batterien oder Su-

percaps diskutiert. Im mittleren Leistungsbereich (10 – 1000 kW) werden den MCFC- und SOFC-Systemen bessere Chancen für den Markteintritt prognostiziert. In den USA besteht ein grosser Bedarf an neuen Stromerzeugungsanlagen (35 GW). Die Nachfrage wird vor allem durch Gasturbinen-Kombianlagen gedeckt werden. Hohe Wirkungsgrade bei günstigen Anschaffungskosten der Kombianlagen bilden grosse Hürden für den Einsatz von Brennstoffzellen. Die US-Stromindustrie ortet ihren Bedarf vor allem bei grösseren Stromerzeugungssystemen (50 MW).

An der internationalen Konferenz **FUEL CELL 2003** im Juli 2003 in Luzern trafen sich wiederum zahlreiche Brennstoffzellen-Fachleute – die BFE-Projekte waren ebenfalls namhaft vertreten – aus Forschung und Privatwirtschaft. Diese jährlich stattfindende Konferenz hat sich mittlerweile zu einem wichtigen Anlass in der internationalen Brennstoffzellenszene entwickelt.

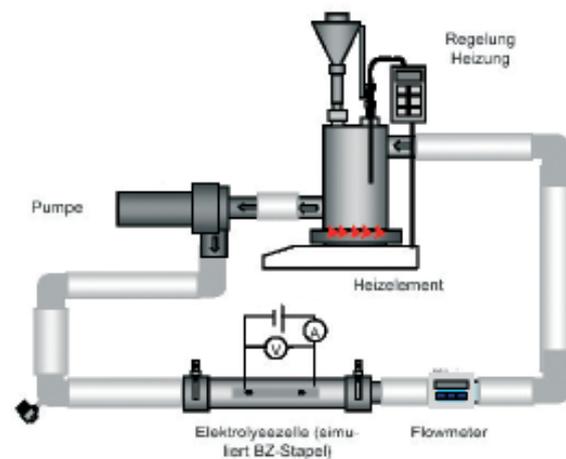
In allen Forschungsschwerpunkten bestehen gute internationale Kontakte, die sowohl projektorientiert als auch an internationalen Konferenzen und Workshops gepflegt werden. So arbeitet das PSI nach dem erfolgreichen Abschluss des P+D-Projekts *BRESA* – ein Netzwerk des PSI mit verschiedenen Projektpartnern und in enger Zusammenarbeit mit den Hauptindustriepartnern Volkswagen AG – schon seit einiger Zeit mit einem namhaften ausländischen Industriepartner an einem Folgeprojekt.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

WASSERSTOFF- UND METHANOL-PEM-BRENNSTOFFZELLEN

Die **Demonstration und Integration von PEM-Brennstoffzellen in Booten** [15] hat an der FH- Yverdon Tradition. In Zusammenarbeit mit dem PSI und der FH-Biel wurden Brennstoffzellen in verschiedene Boote eingebaut und getestet (<http://iese.eivd.ch/Projcts/Hydroxy/hydroxy.html>). Publikumswirksam ist das neueste Projekt, der Einbau einer 3kW-PEMFC in einen Katamaran (siehe Titelblatt Programmbericht). Ein neues Projekt des EIVD ist die Kombination von Brennstoffzellen mit einer Wärmepumpe. Ferner wurden im Rahmen von Diplomarbeiten und Semesterarbeiten mehrere kleinere, interne Projekte bearbeitet.

Im Projekt **Untersuchung des Temperaturverhaltens von PEMFC im Bereich bis -10°C** [16] wird am PSI das Verhalten der Brennstoffzellen bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt von Wasser

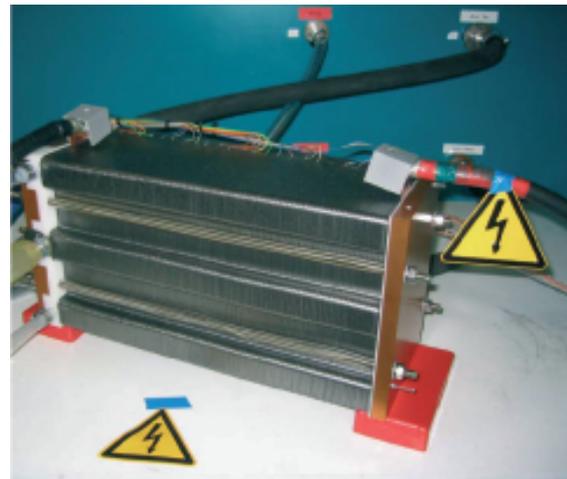


Figur 5: Aufbau der Apparatur zur Simulation des Brennstoffzellen-Kühlkreises bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Simuliert wird die Brennstoffzelle durch ein Elektrodenpaar, durch welches das Kühlmittel fliesst.

untersucht. Das Verhalten der Brennstoffzellen in diesem Temperaturbereich ist vor allem für mobile Anwendungen von Interesse. Problematisch sind sowohl die Kühlflüssigkeit (meistens Wasser) wie auch die wässrige Polymer-Elektrolyt-Membrane. Im Projekt wird abgeklärt, welche alternativen Kühlflüssigkeiten eingesetzt werden können und ob bei Tieftemperaturzyklen bis -10°C irreversible Schäden in der Membrane oder der Aktivschicht auftreten. Zuerst wurde eine Testapparatur aus rostfreiem Stahl hergestellt (Fig. 5). Mit ihr kann in einer Teststrecke der Einfluss der Zellspannung auf die Kühlflüssigkeit untersucht werden. Erste Resultate zeigen, dass gefrierpunktssenkende Substanzen wie z.B. Glykol unter Spannung relativ rasch zu Leitfähigkeitserhöhungen der Kühlflüssigkeit führt, was unerwünschte Elektrolyseaktionen zur Folge hat. Bei Temperaturzyklen bis zu -10°C konnten zudem irreversible Schäden in der Aktivschicht der PEMFC festgestellt werden. Offensichtlich besteht hier ein akuter Forschungsbedarf.

Im Projekt **Brennstoffzellenfahrzeug SAM, Phase I** [17] wurde an der HTA-Biel die für das Fahrzeug SAM der Firma CREE vorgesehene 6 kW-PEM-Brennstoffzelle gebaut und getestet. Die Brennstoffzelle besteht aus 100 Bipolarzellen mit einer aktiven Fläche von 195 cm^2 . Die Konstruktion basiert auf dem PowerPac-Prinzip [8], jedoch mit einer um 25% grösseren aktiven Fläche. Fig.

6 zeigt den Stapel auf dem Prüfstand. Die Eckdaten der Brennstoffzelle sind ausserordentlich gut, jedoch die Materialkosten noch viel zu hoch für einen Markteintritt. Der Brennstoffzellstapel wurde im Frontbereich des SAM-Fahrzeuges (Fig. 7) positioniert, um eine leichte Wartung zu garantieren.

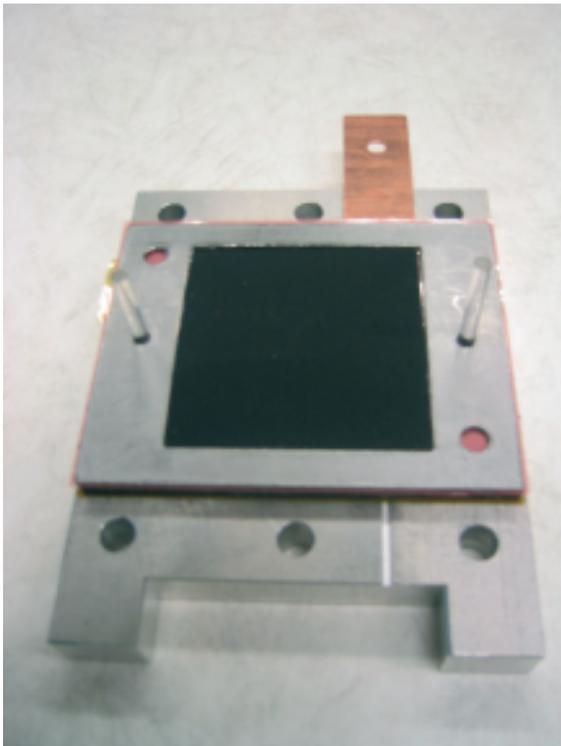


Figur 6: Ein 6 kW-Stapel auf dem Prüfstand; Abmessungen in mm: $450 \times 210 \times 155$, Gewicht: 19.2kg, Elektrische Leistung: 6.1 kW (100A bei 61V), Stromdichte: 510 mA/cm^2



Figur 7: Elektrofahrzeug SAM I und die voraussichtliche Positionierung des 6kW-Stapels im CAD-Modell.

Ziel des Projekts **Entwicklung eines Luftgekühlten Brennstoffzellen-Systems** [18] an der FH-Biel ist, ein neues Konzept (Fig. 8) mit modularem Brennstoffzellenaufbau und kostengünstigen Komponenten auszuarbeiten. Zusammen mit der Hochschule Aargau, Abteilung Gestaltung und Kunst wird dazu mit einem neuen Design für die Systemhülle zur Verbesserung der Systemergonomie beitragen. Kernstück der Brennstoffzelle ist eine Bipolarplatte mit Kühlrippen, hergestellt aus flexiblen Graphitplatten, die mit einem einzigen Stanzvorgang strukturiert werden können. Eine komplette Testzelle (Fig. 8) wurde bereits hergestellt und damit einige Test durchgeführt. 2004 soll nun aus den Testzellen der Stapel aufgebaut werden. Für die Fertigung und Integration der Brennstoffzelle in eine Anwendung wurden Gespräche mit potentiellen industriellen Partnern geführt.

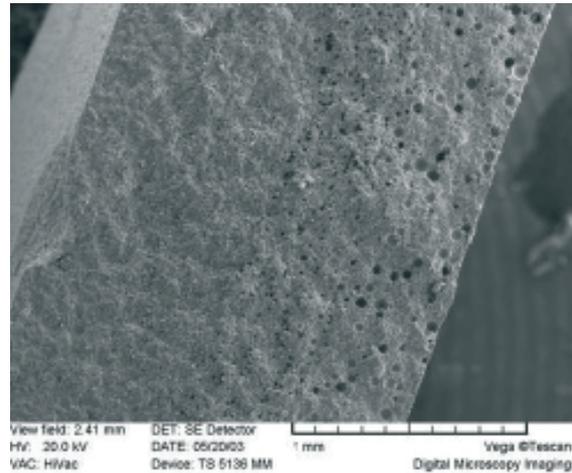


Figur 8: Blick in die geöffnete Testzelle an der FH-Biel

ERDGAS-SOFC-BRENNSTOFFZELLEN

Der EMPA-Dübendorf wurde eine **Studie zur Herstellung von graduierten Anodensubstraten für die Festoxidbrennstoffzellen** [19] in Auftrag gegeben. Für den optimalen Brenngastransport zur Aktivschicht der Anode und den Abtransport der Reaktionsgase muss das Anodensubstrat zweckmässig strukturiert wer-

den. In diesem Projekt wird deshalb mit einem mehrschichtigen Aufbau des Anodensubstrates die Korn- und Porengrösse bis zur Aktivschicht (Dreiphasengrenze Anode/Gas/Elektrolyt) hin graduell verkleinert. Obwohl die Porenstruktur etwa dem angestrebten Ziel entspricht (Fig. 9), ergab die elektrochemische Charakterisierung der Anode noch unbefriedigende Resultate, welche wahrscheinlich auf die ungenügende Gasdichtigkeit der Elektrolytschicht zurückzuführen sind. Eine Wasserstoff/Sauerstoff SOFC mit dieser strukturierten Anode ergab eine Leistungsdichte von 90 mW/cm^2 bei 800°C .



Figur 9: Querschnitt eines vierschichtig gepressten Ni-YSZ Substrat mit graduell ansteigender Porengrösse

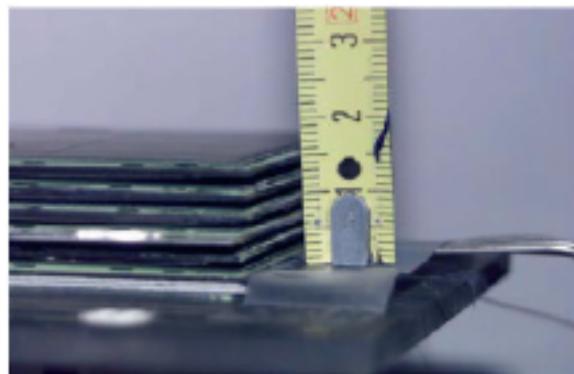
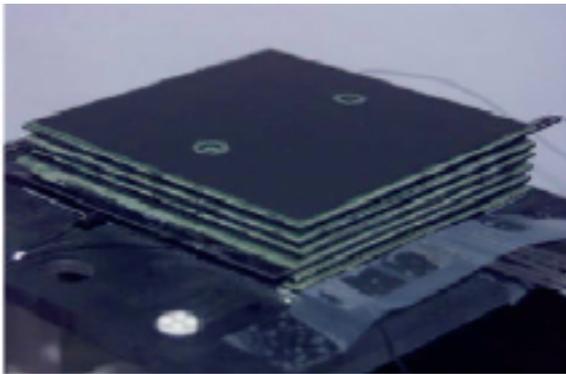
Ziel der Arbeiten im Projekt **Dynamic SOFC System Model Using gPROMS** [20] war die Simulation der stationären und dynamischen Prozesse von Einzelzellen und die Extrapolation experimenteller Resultate auf ganze SOFC-Stapel. Nachdem die Basis des Simulationsmodells definiert und für die gPROMS Simulationssoftware formuliert war, wurde die Simulation einzelner Zellen mit experimentellen Resultaten verglichen. Das dynamische Verhalten während der Anfahrphase sowie in der stationären Phase konnte berechnet und mit experimentellen Werten einer mit Biogas betriebenen 250 W-SOFC-Laborzelle verglichen werden.

Das Projekt **Anode Supported SOFC with Thermal Cycling and Redox Stability** [21] wurde 2002 bei der Firma HTceramix abgeschlossen. Die Redoxstabilität und Temperaturzyklenstabilität der Zellen konnten mit anodengestützten Membranen wesentlich verbessert werden. Der Preis für die erhöhte Redoxstabilität war jedoch eine wesentlich geringere Leistungsdichte als bei der Verwendung von konventionellen Anoden. Die

Vermeidung von Mikrorissen unter Beibehaltung der Leistungsdichte bleibt nach wie vor eine echte Herausforderung.

Im Projekt **100W_{el} SOFCONNEX Based Stack Demonstration** [22] demonstrierte *HTceramix* ein neues SOFC-Design. Fig. 10 zeigt den 6-Zellenstapel, welcher 109 W Spitzenleistung bei 800°C und eine Leistungsdichte von 1 W/cm³ erreichte. Das Hauptziel dieses Projekts wurde mit der Demonstration dieses Stapels erreicht. Beeindruckend ist vor allem die Leistungsdichte. Ungenügend ist aber immer noch die Lebensdauer der Zellen. Mit Einzelzellen wurde bis jetzt eine Lebensdauer von 450 Stunden erreicht. Die Lebensdauer des 6 Zellenstapels betrug 140 Stunden, wobei ein thermischer Zyklus und ein ungewollter Redoxzyklus die Lebensdauer etwas beeinträchtigte. Bei praktischen Anwendungen sind aber

wichtige Produktionsprozesse zur Herstellung der Zellkomponenten im Projekt **Pilot Manufacturing of Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) stacks** [23]. Die in Yverdon installierte Pilot-Produktionsanlage soll den Ausstoss von SOFC-Zellen von 10 auf 100 pro Woche erhöhen und eine genügend gute Reproduzierbarkeit der Zellen garantieren. Sie soll den Zellenbedarf für die anstehenden Demonstrationen der SOFC-Technologie bei interessierten industriellen Anwendern abdecken. Mit der Anlage sollte es auch möglich sein, die Zellkostenreduktion für die künftige Massenproduktion abzuschätzen. Ein erster Batch konnte mit der neu installierten Produktionslinie bereits produziert werden, wobei allerdings die Ausbeute hinsichtlich Quantität und Qualität noch zu wünschen übrig lässt. Zur Optimierung des Produktionsprozesses wurde das bereits beschriebene



Figur 10: Der 6-Zellen-Stapel (80 mm x 80 mm x 16mm) mit anodengeträgertem Elektrolyt.

solche Zyklen auch zu erwarten. Die Brennstoffausnutzung betrug bei diesen Versuchen 53% der elektrische Wirkungsgrad 25%. Dies reicht für kombinierte Wärme-Kraft-Anwendungen aus, da der unverbrauchte Brennstoff in einer zweiten Stufe noch zur Wärmeproduktion weiter genutzt werden kann.

Der Aufbau der Pulverpräparation und die Bandgießeinrichtung (Fig. 11) sind für *HTCeramix* zwei

Projekt [6] gestartet. Die hier gewonnenen Erfahrungen werden auch in ein KTI-Projekt und das EU-Projekt **Real-SOFC** einfließen.

Mit privater Finanzierung wurde auch auf dem Gebiet der alkalischen Brennstoffzellen eine Demonstration eines kleinen Brennstoffzellenstapels gemacht. Der Einmannbetrieb Thomas Pylkänen hat damit ein für ihn wichtiges Ziel erreicht (www. effcell.com).



Figur 11: Aufbau der Pulverpräparation und die Bandgießeinrichtung für die Pilot-Fabrikation von SOFC-Stapeln

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Im **PEM-Technologiebereich** konnte das *PowerPac*-Projekt – eine 1 kW-Brennstoffzelle als tragbares *PowerPac* – erfolgreich demonstriert und abgeschlossen, sowie Fortschritte bei der Suche nach einem industriellen Lead-Partner gemacht werden. Im Jahr 2002 bereits mit dem *Reach-Preis* ausgezeichnet, hat das *PowerPac*-Projekt beim *Swiss Technology Award 2003* als Preis eine Teilnahme an der Hannover Messe (April 2003) gewonnen. Auch die Hannover Messe 2004 soll wiederum als Plattform genutzt werden, Schweizer Produkte – der nächste Kandidat wäre der *SAM* – der internationalen Öffentlichkeit und Konkurrenz vorzustellen. Pressewirksam wurde die Demonstration der 3kW-PEM-Brennstoffzelle im Boot *Hydroxy3000* von der FH-Yverdon umgesetzt. Ebenfalls erfolgreich stattgefunden hat der **PEM-Know-How-Transfer** vom PSI/ETH-Zürich an die FH-Biel, welche künftig als anwendungsorientiertes PEM-Kompetenzentrum auftreten wird. Dabei ist die FH-Horw als Partner im Gespräch.

Im **SOFC-Technologiebereich** haben vor allem *HTceramix* und das neue, mit 6 Partnern interdisziplinäre Vorhaben *OneBat Start* Fortschritte gemacht. Kritische wird für beide das Jahr 2004 sein, wo je ein KTI-Antrag entscheidend für eine Weiterführung der Vorhaben sein wird.

Das **Networking** unter den Forschern und Anwendern der Brennstoffzellen-Technologie durch die beiden vom BFE initiierten Konferenzen hat ausgezeichnetes Feedback erhalten. Es entspricht einem echten Bedürfnis und wird daher fortgesetzt. Für das Frühjahr 2004 ist ein zweitägiges Brennstoffzellen-Modellierungsseminar mit Vortragenden aus der Schweiz und Deutschland mit dem Ziel, enger zusammenzuarbeiten. Vorgesehen sind ebenfalls Gespräche über mögliche gemeinsame Vorhaben mit dem Forschungszentrum Jülich.

Zuhanden der **CORE** sind die Grundzüge für das Forschungsprogramm 2004 – 2007 festgelegt und anlässlich der Energieforschungskonferenz in Luzern definitiv verabschiedet worden. Ebenfalls wurden erste Überlegungen für Brennstoff-

zellen-Roadmaps gemacht. Im kommenden Jahr sollen die Roadmaps vertieft und zusammen mit dem definitiven Programm *Brennstoffzellen 2004 – 2007* der CORE vorgestellt werden.

Der **Internetauftritt** des Programms *Brennstoffzellen* konnte nicht abgeschlossen werden und wird im Jahr 2004 weiter verfolgt. Ein angepasstes Daten-Set für ein *Who is Who* in der Brennstoffzellen-Szene der Schweiz soll dort geeignet platziert werden.

Im Berichtsjahr wurden für das breite Publikum mehrere **Artikel** in den ENET-News platziert. Ein Interview des Programmleiters, publiziert in der Zeitschrift *Cash* im Mai 2003, führte sogar dazu, dass sich ein neuer, ernsthaft interessierter Industriekunde für das *PowerPac* meldete.

Neue SOFC-Entwicklungen sind demnächst von der Start-up Firma *HTCeramix* zu erwarten. Sie will 2004 ihre Produkte einem kleinen Käuferkreis anbieten. Ihre Fertigungsstätten sind derzeit in Yverdon im Aufbau begriffen. Mit dem neuen, interdisziplinär aufgebauten Projekt **OneBat Start** [9] wurde ein neuer Schwerpunkt geschaffen. Die Fachkompetenzen in Mikromanufacturing, Chip-technologie, Brennstoffzellentechnologie der beiden ETH und drei Fachhochschulen wurden gebündelt mit dem Ziel *proof of concept* einer Mikrobrennstoffzelle.

Die **internationale Verknüpfung und Vernetzung** des Programms wurde im Berichtsjahr sowohl in der IEA als auch im EU-Bereich verstärkt. Im Jahr 2004 steht bei der EU der CH-Einsatz in der *Mirror group* der *Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform* und bei der IEA die Verlängerung des *Implementing Agreements Advanced Fuel Cells* sowie die Definition und Beteiligung an den neuen Annexen im Vordergrund. Die Vernetzung der nationalen Forschungsaktivitäten und -kompetenzen ist ein wichtiges Programm-Ziel. Sie wird in den kommenden Jahren auch auf unsere Nachbarländer ausgedehnt werden. Sowohl in der EU als auch in der IEA wird die Schweiz verstärkt Präsenz markieren und ihre Kompetenz einbringen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2003 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

- [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 Micro-structured Materials for Fuel Cells** (JB).
- [4] O. Büchi, M. Roos, (felix.buechi@psi.ch), PSI, Villigen, (markus.roos@zhwin.ch) ZHW, CCP, Winterthur: **Numerische Modellierung von PE-Brennstoffzellen mit FE Methode**, (JB).
- [5] P. Holtappels et al. (peter.holtappels@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Intermediate Temperature Fuel Cells based on Ceramic Proton Conducting Electrolytes** (JB).
- [6] 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**, (JB).
- [7] D. Larrin et al. (diego.larrain@epfl.ch) EPF, Lausanne: **Transient response and degradation behaviour in novel SOFC short stacks**, (JB).
- [8] F. Marèchal et al. (Francois.Marechal@epfl.ch) LENI/EPFL, Lausanne: **Energy Integration and Fuel Cell Systems** (JB).
- [9] G. Robert (gilles.robert@sulzer.com) Sulzer Innotec, Winterthur: **OneBat Start** (JB).
- [10] L. Gauckler et. al. (ludwig.gauckler@mat.ethz.ch), ETH, Zürich: **Battery Replacement Using Fuel Cell Hybrid System**, (JB).
- [11] D. Poulidakos et al. (dimos.poulidakos@ethz.ch), LTNT, ETH-Zürich, **Efficient Reforming**, (JB).
- [12] P. Muralt et al. (paul.muralt@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).

Liste der P+D-Projekte

- [15] J. Affolter (affolter@eivd.ch), EIVD/HES-SO, Yverdon, **Activités à l'EIVD dans le domaine des Piles à Combustibles**.
- [16] F. Büchi et al. (felix.buechi@psi.ch), PSI, Villigen **Untersuchung des Temperaturverhaltens von PE_BZ im Bereich bis -10°C** (JB).
- [17] T. Lüthi et al. (thomas.luethi@hti.bfh.ch) Hochschule für Technik und Informatik, Biel **Brennstoffzellenfahrzeug SAM, Phase I** (JB).
- [18] M. Ruge et al. (martin.ruge@hta-bi.bfh.ch), Hochschule für Technik und Informatik, Biel **Entwicklung eines Luftgekühlten Brennstoffzellen-System** (JB).
- [19] P. Holtappels et al. (peter.holtappels@empa.ch) EMPA, Dübendorf, **Studie zur Herstellung von gradierten Anodensubstraten für die Festoxidbrennstoffzellen** (JB).
- [20] N. Autisser et al. (nordahl.autissier@epfl.ch) EPF-Lausanne **Dynamic SOFC system model using gPROMS** (SB).
- [21] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Science Park PSE-C, Lausanne, **Anode Supported SOFC with thermal cycling and redox stability**, (SB).
- [22] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Science Park PSE-C, Lausanne, **100 Wel SOFCONNEX based Stack Demonstration** (SB).

- [23] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Science Park PSE-C, Lausanne, **Pilot manufacturing of Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) stacks** (JB).
- [24] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENTZ Basel, **Übersicht der Beteiligten an der Brennstoffzellentechnologie in der Schweiz** (JB).
- [25] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENTZ Basel, **Struktur BFE-Webseite Brennstoffzellen** (JB).
- [26] M. Spirig, K. Höhener, (temas@temas.ch), Temas AG, 9320 Arbon, **Umsetzung der PEM-Technologie** (JB).

Referenzen

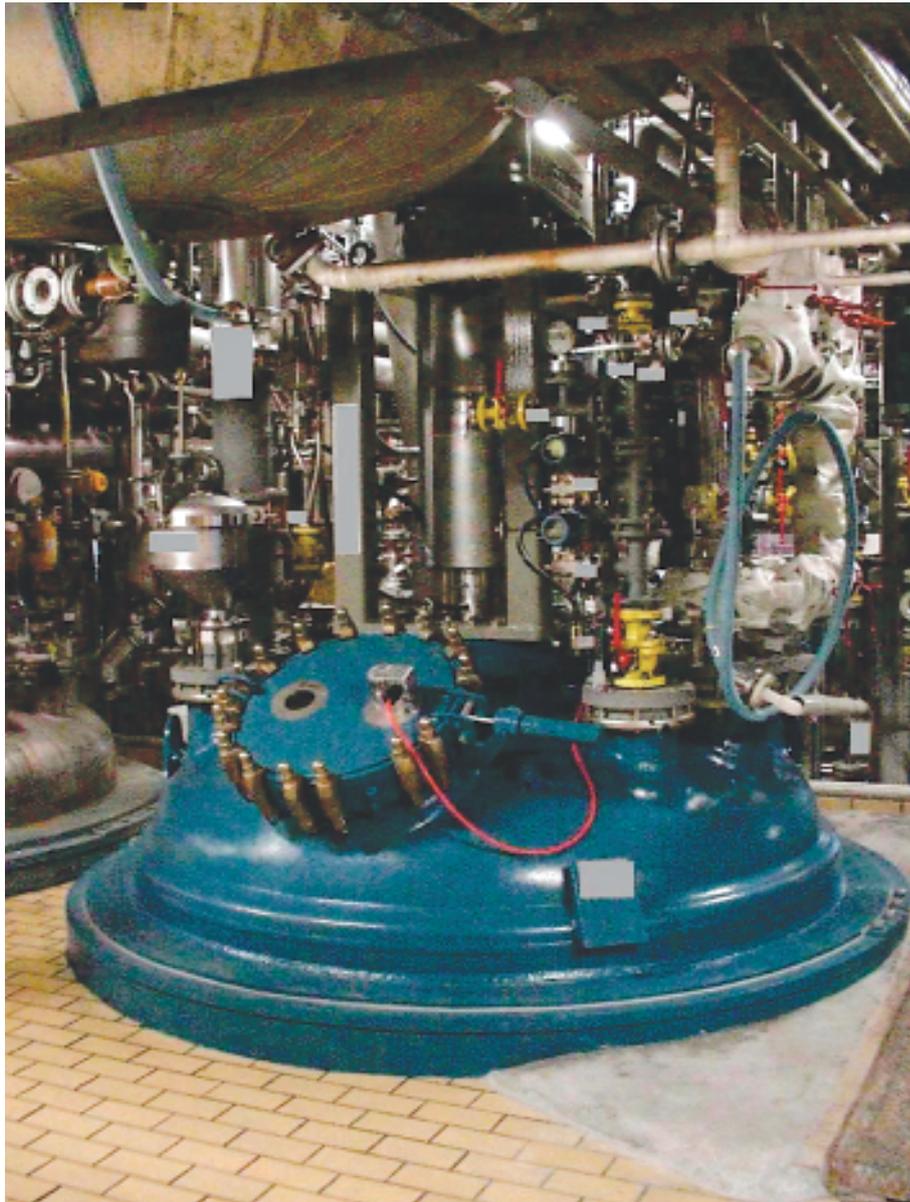
- [27] F. Büchi, (Felix.buechi@psi.ch), PSI, Villigen: **Das PowerPac Keimzelle weiterer Forschungsprojekte** Abschluss-Seminar des PowerPac-Projekts, 8. Mai 2003.
- [28] A. Hintermann (alphons.hintermann@bfe.admin.ch), BFE, 3003 Bern: **Meeting Networking Brennstoffzellen Schweiz, 24. Februar 2003** Bericht mit Datenblättern der Teilnehmer und deren brennstoffzellenrelevanten Kompetenzen.
- [29] A. Hintermann (alphons.hintermann@bfe.admin.ch), BFE, 3003 Bern: **CD-rom Swiss Fuel Cell Seminar, EIVD, Yverdon-les-Bains, 3. May 2003.**
- [30] D. Favrat, (Daniel.favrat@epfl.ch), Institut des Sciences de l'Énergie, STI, ISE-LENI, EPF, Lausanne: **Solid Oxide Fuel Cell Stack Based on Anode Supported thin Electrolyte Cells** (SB). KTI-Projekt : 5041.2 SUS.
- [31] A. Hintermann (alphons.hintermann@bfe.admin.ch), BFE, 3003 Bern, **Brennstoffzellen Forschungs- und Umsetzungsprogramm 2004 - 2007**, in Vorbereitung.
- [32] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENTZ Basel, **IEA Task XII Stationäre Brennstoffzellen Demonstration und Markteinführung** (SB).

VERFAHRENSTECHNISCHE PROZESSE

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Martin Stettler

martin.stettler@bfe.admin.ch



Industrie-Reaktor (Quelle: ETHZ/Ciba)

Typischer Reaktor, wie er u.a. in der Spezialitäten-Chemie eingesetzt wird. Gut sichtbar sind die Dampf- und Versorgungsleitungen sowie das Rührwerk. Im Behälter im Vordergrund wird Sole hergestellt.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Programm *Verfahrenstechnische Prozesse VTP* befasst sich mit den Grundlagen zur energetischen Optimierung von industriellen Prozessen und deren Infrastruktur. Inhaltlich orientiert sich das Programm am Forschungsbedarf der Industriesektoren Spezialitäten-Chemie und Lebensmittelbranche, Papier-, Metallherstellung und Maschinenbau. Diese Industriezweige betreiben einfache wie auch komplexe verfahrenstechnische Prozesse, in denen erhebliches energetisches und somit auch wirtschaftliches Sparpotenzial liegt. Der so genannten Prozess-Integration (PI) kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu. Zur PI gehören Analyse, Synthese und Modellierung von verfahrenstechnischen Prozesssystemen unter Berücksichtigung ihrer Subsysteme und Komponenten und deren Zusammenspiel mit dem Ziel, Energie, Wasser und Rohmaterial rationeller einzusetzen. Nebst direkten Kontakten zur Industrie und den

Hochschulen soll auch die Zusammenarbeit mit der *Energieagentur der Wirtschaft (EnAW)* verstärkt werden, die heute ein Netzwerk von rund 1000 Industrie- und Dienstleistungsunternehmen betreut und mit diesen CO₂-Zielvereinbarungen abschliessen wird. Die *EnAW* deckt damit rund 40% der CO₂-Emissionen unserer Wirtschaft ab.

Das Programm war bis Ende 2003 im Forschungsprogramm *Umgebungswärme, Abwärme, Wärmekraftkopplung* in der BFE-Sektion *Erneuerbare Energien* integriert. Neu liegt dieser Bereich in der Verantwortung der BFE-Sektion *Wirtschaft*. Das Programm verfügt im Moment nur über bescheidene Mittel und wird neu strukturiert. Im Berichtsjahr wurden zwei Projekte weiter geführt und erste Arbeiten zur Programmgestaltung an die Hand genommen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

Das Projekt **Analyse und Modellierung des Energiebedarfs in Batch-Prozessen** [1] verfolgt das Ziel, mit möglichst wenigen Parametern den Energiebedarf eines Batch-Prozesses inkl. seiner Infrastruktur mit genügender Genauigkeit modellieren zu können. Dabei zeigten die Module *Dampf* und *Strom* eine gute Übereinstimmung ($\pm 10\%$) mit den gemessenen Daten. Es konnte auch gezeigt werden, dass die Dampferzeugung/-Verteilung sowohl für die Reaktorheizung als auch für die Gebäudeheizung (Infrastruktur) mit grossen Verlusten behaftet ist. und damit ein erhebliches Sparpotenzial darstellen. Grösste Stromverbraucher sind die Reaktoren und Druckrührnutschentrockner.

In einem Nachfolgeprojekt (2004-07) werden die aktuellen Modelle (Topdown und Bottom up) an weiteren Batch-Betrieben ausgetestet und soweit konditioniert, dass die Modelle allgemeine Gültigkeit erlangen können. Wenige, zusätzlichen Messungen (Dampf, Strom und vor allem Sole) werden noch nötig sein, um die beabsichtigte Standardisierung der Hauptverbraucher zu vervollständigen. Schliesslich sollen die Modelle, mit nur wenigen Inputparametern (Betriebsvorschrift) auskommen um eine verlässliche Prognose und Optimierung des Energiebedarfs in der Prozess-Design-Phase zu ermöglichen.

Im Projekt **Abfall-Lösungsmittel-Verwertung in der chemischen Industrie** [2] geht es um den nachhaltigen Umgang mit Abfall-Lösungsmitteln (ALM). Es stehen zwei Verwertungsmöglichkeiten zur Verfügung: Auftrennen (Destillation, Rückgewinnung) oder thermische Verwertung, d.h. Verbrennen (Erzeugung von Prozesswärme). Nach der anfänglichen Situationsanalyse des heutigen ALM-Managements wurde ein erstes Systemmodell für eine Ökobilanzierung erarbeitet und die Daten zu den Stoffflüssen und eingesetzten Technologien erhoben. Anhand zweier Fallbeispiele werden noch die Einflussparameter der stofflichen Wiedergewinnung identifiziert und auf deren Sensitivität geprüft. Mit der Analyse die petrochemische Lösungsmittelherstellung wurde bereits begonnen. Im Bereich der thermischen ALM-Verwertung konnte ein erstes Multi-Input-Allokationsmodell für Zementwerke entwickelt werden. Damit können Ökoinventare inkl. Energienutzung für spezifische ALM-Gemische berechnet werden. 2004 werden die Fallbeispiele abgeschlossen und die Lösungsmittelinventare verbessert werden. Beim Destillationsprozess (Wiederverwendung) werden noch die Prozessparameter analysiert und dessen Unsicherheiten quantifiziert. Im Frühjahr 2004 wird ein einfaches EDV-gestütztes Bewertungstool erstellt und den beteiligten Unternehmen zum Test überlassen, damit die Bedürfnisse in der Praxis frühzeitig berücksichtigt werden können.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Expertengruppe *Prozess Integration*, die aus Vertretern der Industrie, Behörden und Wissenschaft bestand, wurde vor wenigen Jahren wegen fehlendem Industrie-Interessens aufgelöst. Zur Zeit ist nur die Zusammenarbeit mit der ETHZ und damit mit der Basler Chemie etabliert. Gespräche

mit Abteilung Energietechnik der EPFL zum Thema haben stattgefunden, führten bisher noch zu keinen gemeinsamen Projekten. Die EPFL verfügt ebenfalls über grosses Know-How betreffend energetischer Optimierung von VTP und pflegt u.a. interessante Kontakte zur Lebensmittelbranche.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Das Programm VTP wird bis Herbst 2004 die Forschungskompetenzen an den Hochschulen und Fachhochschulen weiter erheben und die Bedürfnisse der entsprechenden Schweizer Industrie abklären und als Forschungskonzept festhalten. Diese Abklärungen werden u.a. zeigen, ob ein Wiedereintritt der Schweiz in das IEA-Implementing Agreement *Process-Integration* zweckmässig wäre.

Ein Kurzbeschrieb des Programms VTP mit den Schwerpunkten, Bedingungen und Zieladresse für Projektanträge wird in Kürze auf Internet aufgeschaltet (www.energie-schweiz.ch, Rubrik Ratgeber&Angebote / Angebote Unternehmen). Auch die Projektberichte können dort heruntergeladen werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2003 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

Die Projektberichte können von www.energie-schweiz.ch, Rubrik Ratgeber, Angebote Unternehmen heruntergeladen werden

- [1] Patric S. Bieler, (pbieler@tech.chem.ethz.ch), Lab. für technische Chemie ETH Zürich: **Analysis and Modelling of the Energy Consumption of Chemical Batch Plants** (SB).
- [2] Christian Capello, (capello@tech.chem.ethz.ch), Lab. für technische Chemie, ETH Zürich: **Abfall-Lösungsmittelverwertung in der chemischen Industrie, Phase 2** (JB).

SOLAIRE ACTIF : CHALEUR ET STOCKAGE DE CHALEUR

Rapport de synthèse 2003 pour le programme de recherche et les programmes P+D

Jean-Christophe Hadorn; Pierre Renaud

jchadorn@baseconsultants.com info@planair.ch



Chauffe-eau solaire à thermosiphon

Le pôle de compétence du SPF Rapperswi conduit des tests de qualité d'installations solaires thermiques qui sont reconnus au plan international.

Centres de gravité du programme et buts fixés

Le solaire thermique peine à être déployé largement, malgré ses coûts proches de la rentabilité, son acceptation assez grande dans le public et la qualité des entreprises, certaines avec plus de 20 ans d'expérience sur le marché. Ce dernier a malgré tout tendance à régresser (figure 1).

Le fait que les installations solaires soient généralement dimensionnées pour 30 à 40% des besoins, et ne puissent pas atteindre aisément 50, 75, voire 100%, est un facteur limitant pour le choix du solaire par les propriétaires. Pour la période 2004-2007 nous orienterons certains travaux dans ce but.

Notre programme a ainsi recherché durant l'année 2003 à renforcer :

- ❑ la qualité des composants des capteurs et la durabilité des matériaux du solaire,
- ❑ l'optimisation des systèmes combinés par la mesure et la simulation,
- ❑ la recherche de matériaux plus denses que l'eau pour le stockage de chaleur, afin d'augmenter la part solaire dans une installation sans augmenter nécessairement les volumes de stockage,
- ❑ le développement d'une solution pour les capteurs solaires de couleur afin de donner plus de liberté lors des choix architecturaux,

- ❑ la finalisation potentielle d'un projet de stockage pour 100 logements à Zürich, pour démontrer la possibilité d'un apport solaire dépassant les 50% dans le collectif.

Pour atteindre ses objectifs, le programme *Solaire actif : chaleur et stockage de chaleur* a été organisé en 2003 autour des axes suivants :

1. **Capteurs solaires** : maintenir et développer la plateforme de tests du SPF de l'École d'ingénieurs de Rapperswil, qui permet les tests de qualité des capteurs sur le marché, la comparaison des capteurs et le support aux industriels du solaire qui peuvent trouver un interlocuteur compétent pour améliorer leurs produits.

2. **Systèmes combinés standardisés** : grâce aux travaux de la Tâche 26 **Solar Combisystems** du Programme *Solar Heating and Cooling (SH&C)* de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie), le SPF a réalisé et utilisé un banc d'essai complet des systèmes combinés à Rapperswil, afin de pouvoir caractériser un système dans son ensemble par mesure et simulation, puis l'améliorer de manière à ce qu'il devienne un standard *testé au banc*, gage de confiance pour un acheteur.

3. **Solaire à concentration** : le capteur solaire à concentration CEP, que Cogener de Lausanne met au point depuis plusieurs années, devait trouver des débouchés industriels.

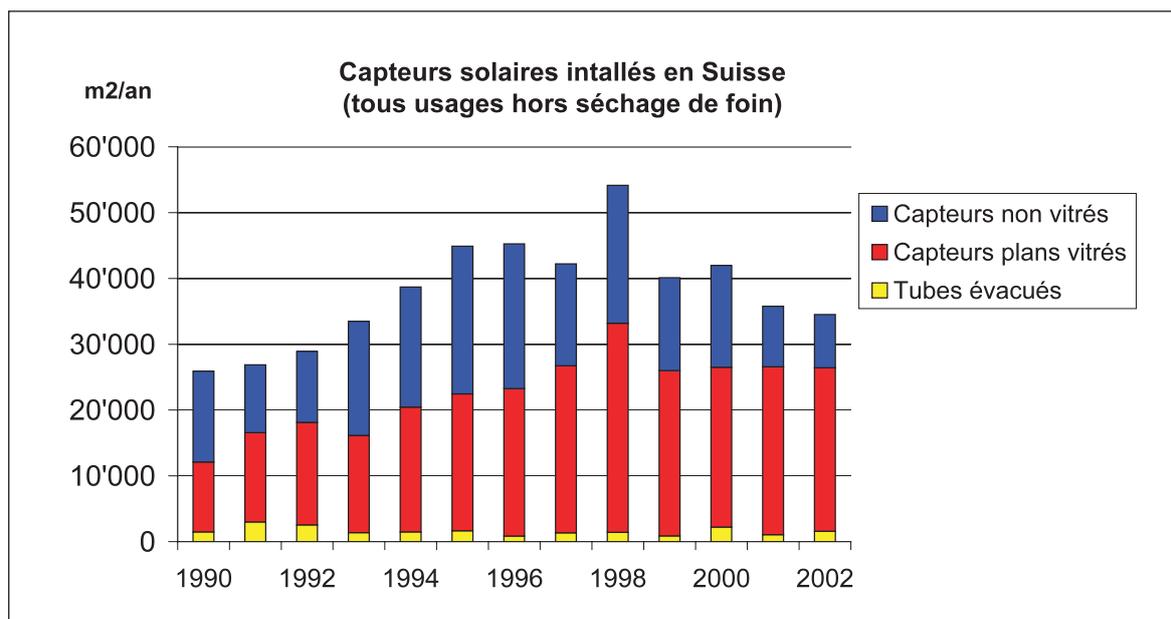


Figure 1 : évolution des surfaces (en m²/an) de capteurs solaires thermiques installés annuellement en Suisse depuis 1990 (Source SOLAR, 2003). N.B. : la statistique 2003 a été entièrement remanié par ses auteurs pour la version 2003 et n'est pas totalement comparable à celle des années précédentes.

4. **Stockage saisonnier de chaleur** : le projet de Heumatt, Zürich, identifié en 2002 et susceptible de recevoir un stock saisonnier de chaleur, devait être finalisé. Les projets de Wollerau et Serse, mesurés depuis plusieurs années, devaient être optimisés *a posteriori* par simulation calée, de manière à tirer un profit maximum de ces projets pilotes.

5. **Stockage du futur** : le lancement de la nouvelle Tâche 32 **Advanced storage concepts for solar buildings** du Programme SH&C de l'AIE, que nous avons mise sur pied depuis un an, était prévu.

Nous avons veillé à conserver des équipes cohérentes dans nos différents axes et à regrouper les forces en pôle d'excellence, en évitant une dispersion de moyens.

Notre programme 2003 respecte les objectifs énoncés dans le *Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération 2000-2003*, établi par la Commission fédérale CORE.

Travaux effectués et résultats acquis en 2003

COMPOSANTS DE LA TECHNIQUE SOLAIRE

Capteurs solaires thermiques et matériaux

Les travaux de ce secteur représentent une part importante du programme. Ils sont faits par le pôle de compétences du SPF à Rapperswil. En 2003, nous avons soutenu les développements de matériel de mesures au SPF et réalisé les travaux suivants [1, 2, 3, 4] :

1. **Mesure des caractéristiques et test de qualité des capteurs solaires** : les logiciels de mesure ont été rénovés complètement et, avec l'aide d'une météorologie favorable, la durée d'un test a pu être fortement réduite. Plus de 120 capteurs à eau ont été testés en 2003, de 60 types différents ! 45 l'ont été pour la mesure des performances et 25 pour le test de qualité, que seuls 13 ont passé avec succès. Les capteurs proviennent principalement de Suisse, mais aussi d'Allemagne, d'Autriche, de Chine et, fait nouveau, de Pologne et Tchéquie. Près de 25% des capteurs testés étaient des capteurs à tubes évacués, signifiant leur retour sur le marché, poussés par la production chinoise. Ces capteurs sont plus sensibles à la grêle et un banc d'essai spécial est en cours de montage pour un nouveau test de résistance aux grêlons le plus réaliste possible. Le verre solaire anti-reflet se généralise, mais il pose encore des problèmes liés à la salissure. Le problème habituel des capteurs solaires est apparu sur nombre de capteurs : ils sont insuffisamment ventilés et ne peuvent revenir à un équilibre avec l'extérieur en moins de 2 jours, comme c'est le cas pour les bons capteurs, entraînant une dégradation des surfaces internes du capteur, notamment celle de l'absorbeur. Ce test du SPF n'est malheureusement pas dans la norme internationale actuelle.

2. La qualité des capteurs sur le marché n'a pas été dans le sens d'une amélioration en 2003. De mauvais choix de matériaux ou des études insuffisantes poussent les fabricants à retirer leurs capteurs en cours de tests, suite aux premières indications du SPF. Cela va dans le sens du maintien de la qualité sur le marché, mais dénote une pression subie par les fabricants.
3. De nouveaux concepts ont pu être testés, notamment grâce la collaboration entre le SPF et l'industrie suisse, qui existe depuis de nombreuses années. Un banc d'essais pour un élément de façade a ainsi été monté et est en cours d'utilisation.



Figure 2 : nouveau banc test de façade solaire verticale, développé par le SPF dans le cadre de SOLABS

1. Le SPF est le premier institut européen à mettre en œuvre le nouveau label européen de qualité **Solar Keymark** avec l'aide du DINCERTCO d'Allemagne. Des tests *round robin* sont menés entre différents laboratoires accrédités en Europe de manière à obtenir des résultats homogènes et à expliquer les différences observées entre les mesures de différents laboratoires en Europe. Le SPF est accrédité également pour le label *DIN-geprüft*. Cela permet de conserver une qualité irréprochable aux mesures faites au SPF, alors que les ressources pour participer à la normalisation CEN manquent.
2. Le **CD-ROM SPF-Info CD 2004** a été préparé avec tous les capteurs testés au SPF, ainsi qu'une nouveauté, le *Solar Collector Factsheets*, qui est également disponible en ligne sur le site Internet du SPF. Il sera disponible au début de 2004. La distribution sera pour des raisons de coût plus ciblée que par le passé, et ne sera pas gratuite.
3. La Tâche 27 **Performance of solar façade components** du Programme SH&C de l'AIE a terminé l'ouvrage *Performance and Durability Assessment : Optical Material for Solar Thermal* qui sera publié en 2004 chez Elsevier Science. La sous-tâche s'occupant de tests de matériaux, dirigée par le SPF été prolongée de 2 ans pour pouvoir mieux évaluer la durabilité des polymères, réflecteurs, et verres anti-reflets.
4. De nombreux travaux et examens ont été réalisés au SPF en 2004 sous contrats industriels : *design* par *ray-tracing* d'un capteur à tube sous vide, étude des raccords entre absorbeurs aluminium et tubes de cuivre, tests au banc spécial de la tenue au stress thermique et mécanique de 12 types de raccord entre capteurs, mesure de dégazage des isolants, joints d'étanchéité en élastomère et pâtes de soudure dans un capteur, tests (non concluants) de protection d'échangeur à plaque contre le dépôt de calcaire, tests de pâtes de soudure (1 seul résultat positif), mesure du facteur F' des absorbeurs de nouveau type (cuivre-cuivre à soudure laser, cuivre-aluminium avec colle), évaluation de divers colles et de matériaux d'étanchéité pour la face avant des capteurs vitrés à caisson.
5. Après 3 ans d'exposition extérieure statique, tous les échantillons de couverture transparente exposés aux intempéries ont été mesurés en transmission spectrale et en angle d'incidence, et comparés à un échantillon identique non exposé. Les résultats sont présentés dans le CD 2004 du SPF.
6. Un nouvel appareil de mesures des absorbeurs sous vide et à haute température a été imaginé et réalisé de manière à satisfaire au besoin d'une expertise sur la dégradation des couches sélectives fortement sollicitées. Il permet d'exposer un échantillon à un cycle chaud/froid dans un vide significatif, tout en mesurant la température de surface atteinte par l'échantillon d'absorbeur, mais sans éclairage, On teste ainsi l'effet de la température, avant tout, et celui des cycles jour/nuit que subit un absorbeur dans un tube sous vide. Au delà de 360 °C, les effets de la température sur 2 absorbeurs sélectifs de 2 marques différentes sont notables.
7. Les instruments optiques du SPF ont été entretenus et améliorés, de manière à respecter la norme CEN. Le test de qualité solaire des verres de couverture, test **Solarglas** mis au point au SPF, et adopté par le label européen *Solar Keymark* a été passé par 3 produits soumis par les industriels. Des améliorations ont pu être proposées à l'un d'entre eux, dont le produit ne passait pas *a priori* le test.
8. Le stand de **test des cuves** de stockage du SPF a été intégré au stand des essais de système combiné.

Nouveaux matériaux

Un développement original débuté en 2002 s'est poursuivi au LESO/EPFL. Nous ne pouvions pas en parler en 2002, car un dépôt de brevet était en cours. Il s'agit de réaliser des vitrages solaires de couleur permettant de développer des capteurs solaires de différentes couleurs. Il y a deux voies pour réaliser cela : soit essayer de colorer l'absorbeur tout en le conservant sélectif, soit essayer de colorer le verre. La première approche est traitée dans un projet européen auquel participe le SPF et le LESO. La deuxième approche est plus originale et nouvelle. Elle est exclusive du LESO, en partie en partenariat avec l'Université de Bâle. Les verres



Figure 3 : échantillons de verre solaire colorés en couches minces interférentes par le procédé SolGel

solaires de couleur peuvent en outre avoir des débouchés hors des capteurs solaires, en architecture notamment. L'approche du LESO est le dépôt de couches minces qui interfèrent et réfléchissent une longueur d'onde particulière, donnant ainsi un aspect coloré.

La difficulté est de réaliser une couche mince durable, à un coût faible, homogène sur toute une surface de 1 à 2 m², et n'absorbant ou ne réfléchissant qu'une part la plus faible possible du rayonnement solaire. Cette prouesse a été réussie par A. Schüler sur des échantillons de 5 cm par 5 cm. La phase I a atteint ses objectifs : des échantillons de couleurs diverses, n'occultant que 8% de l'énergie incidente sur l'absorbeur, ont été produits pour la première fois au monde. Des couches de SiO₂ et de TiO₂ sont déposées en épaisseur de 30 à 150 nm. Un modèle numérique qui permet de prédire le résultat selon les couches a été développé et validé, de telle sorte que l'on peut essayer de chercher la combinaison la plus simple de couches qui produise l'effet recherché en couleur et avec une perte minimale d'énergie transmise. La mise au point du procédé de dépôt par Solgel sur une surface de 20 cm par 20 cm est en cours. Une méthode de mesure des échantillons par ellipsométrie est utilisée. La phase II démarrera en 2004 pour 3 ans, et aura 2 enjeux : d'une part, déposer sur une grande surface, d'autre part, choisir la meilleure méthode de dépôt, soit en sol-gel, soit en magnétron sputtering. Une collaboration entre l'EPFL et l'Université de Bâle, qui dispose des installations PVD, est mise sur pied à cet effet [10a, 10b]. Les résultats de ces travaux devraient déboucher sur un prototype industriel de verre solaire de couleur, voire sur une production, si l'association d'un verrier au projet s'avère possible. Un brevet a été déposé (PCT) et

des publications de niveau international ont été faites en 2003.

Outils de simulation

Les outils de simulation restent importants pour tout projet solaire afin de minimiser les risques d'erreur et de dimensionner au mieux une installation pour satisfaire un client. Notre programme soutient depuis plusieurs années le développement et la maintenance de 2 types d'outils : un logiciel de fourniture de données météorologiques fiables (Meteonorm) et un logiciel de simulation des installations thermiques (Polysun). En 2003 :

1. Le logiciel **Meteonorm** a vu la sortie de sa version 5 après 2 ans d'effort de la part de Meteotest [9].
2. Une mise à jour de **Polysun** (3.3.6) a été proposée par le site Internet du SPF en mai, et une autre (3.3.7) sera distribuée via le CD-ROM SPF Info 2004. Elle contient la possibilité de dimensionner les capteurs pour une fraction solaire imposée. 120 licences nouvelles ont été vendues en 2004, et le site Internet du SPF a vu 4'600 téléchargements de la version de démonstration [4].
3. Comme en 2002, des versions spéciales de Polysun ont été développées pour certains clients (AMK) qui désirent pouvoir distribuer une version du logiciel figée sur leurs produits particuliers. Le client de 2002 (Solvis) a commandé une mise à jour.
4. Les travaux pour une nouvelle version de Polysun (4) entièrement remanié et reprogrammé ont avancé normalement, et le programme est prêt à 90%. Programmé objet en Java, Polysun 4 sera plus facile à maintenir, d'une part,

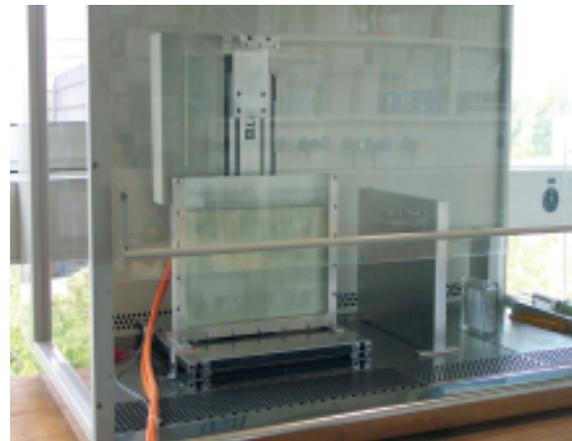
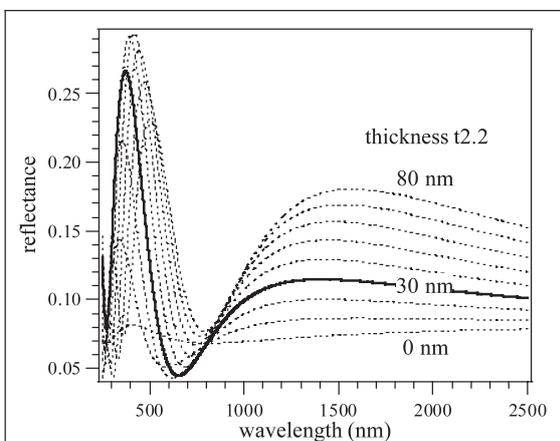


Figure 4 : spectre de réflexion calculé pour un dépôt double face sur un verre à indice de 1,52 et banc de dépôt des couches minces sur le verre par procédé SolGel, réalisé par le LESO

et, d'autre part, permettra à l'utilisateur plus de convivialité, par exemple, avec la possibilité de définir aisément sa configuration de système, en sus des systèmes standardisés qu'on lui connaît maintenant, le tout via un simple navigateur web. La durée d'une simulation annuelle devrait toutefois rester sous la barre de la minute sur un PC récent.

5. Le site Internet (5 langues) du SPF continue de recevoir 100 à 150 visiteurs par jour, principalement en provenance d'Allemagne. Le SPF gère ainsi une base de 4'500 adresses et 8'000 inscrits. Les *Solar Collector Factsheets* ont été mises en ligne durant 2003 et sont un outil étonnant de renseignement précis et rapide sur tous les capteurs testés au SPF (plus de 310 capteurs, dont 132 avec une fiche détaillée !). Elles remplacent le catalogue papier que l'on connaissait avant 1999, puis le catalogue en ligne dès 2000, les feuilles tests de capteurs et les anciennes tables BWE (*Brutto Wärme Ertrag*). Ce sont 122'000 rapports de tests et de systèmes qui ont été téléchargés par les utilisateurs en 2003 !
6. Le serveur interne du SPF, portant toutes les mesures de tous les tests, s'est comporté de manière satisfaisante grâce aux mesures d'entretien et de prévention prises (montage en Raid 5).
7. Le logiciel de CFD (*Computer Fluid Dynamics*) FLUENT a été acquis et implémenté au SPF. Il a été utilisé pour l'analyse détaillée des circulations de fluide dans un absorbeur en échelle du type de ceux que le logiciel Absorber Master du SPF peut simuler et optimiser. Cela afin de mieux cerner les macro-coefficients de transfert de chaleur et de pertes de charge, tels qu'utilisés par un logiciel de dimensionnement, en l'occurrence *Absorber Master*.

Dissémination des données météorologiques pour le projet solaire

Meteotest participait pour la Suisse au projet **SoDa**, un projet du programme IST (*Information Society Technologies*) du 5^e Programme-cadre de l'UE, qui consiste à évaluer les fonctionnalités et méthodes nécessaires pour une mise en réseau par Internet de données météorologiques pour tout type d'utilisateur (ingénieur solaire, en bâtiment, ou en ventilation et climatisation, météorologue, tourisme, industrie,...). Le projet s'est achevé après 3 ans en mai 2003. Un site a été bâti autour du concept d'échange de données, SoDa, mis au point par les 11 organismes européens qui y participaient. Les algorithmes d'interpolation

spatiale du rayonnement ont été améliorés. L'interconnexion dynamique en temps réel de bases de données météo diverses a été réalisée. Le site Internet a été ouvert en février 2002 et a fonctionné depuis, délivrant via le web toute donnée météo utile, pour la planète (www.soda-is.com). Au total, le Service SoDa offre 46 services météo en ligne [11].

Le problème principal reste la notoriété insuffisante du site (importante promotion nécessaire) et le modèle d'affaires de SoDa. Le projet n'est pour le moment pas repris par une entité privée commerciale. Le site fonctionnera jusqu'à mi-2004 sur une base sponsorisée par un membre du consortium.

SYSTÈMES ET INSTALLATIONS SOLAIRES POUR LE BÂTIMENT

Systèmes combinés : mesures et optimisation

Les systèmes combinés *eau chaude et chauffage* sont ceux que le marché demande actuellement, comme nous l'avions anticipé en 1997, en créant la Tâche 26 **Solar Combisystems** du Programme SH&C de l'AIE. Cependant, les niveaux de qualité et d'optimisation restent très hétérogènes entre les fabricants du fait de la complexité de ces installations. En matière de systèmes, les travaux suivants ont été accomplis :

1. les **kits solaires de préparation d'eau chaude sanitaire** pour une maison familiale sont testés depuis plusieurs années au SPF. En 2003, 4 kits commerciaux ont été évalués, notamment un prototype de système à thermosiphon [2].
2. l'exploitation du banc d'essai des **systèmes dit combinés** a été une des missions principales du SPF en 2003. Le banc permet de simuler les apports solaires et la demande en chaleur d'un bâtiment pour un système combiné comprenant la cuve de stockage, l'échange solaire, la distribution, la régulation et surtout l'appoint réel. En 2003, 14 systèmes complets ont pu être analysés sur le banc du SPF dans le cadre d'une campagne *Kombi-Kompakt* lancée en 2002. La mesure d'un système est délicate (12 jours de mesure sont nécessaires pour reproduire la variabilité des modes de fonctionnement d'une année) et les systèmes souvent testés pour la première fois ne se comportent pas comme le constructeur l'attendait ! La simulation en temps réel de l'installation mesurée est un avantage décisif pour évaluer les performances annuelles à partir des

caractérisations à court terme relevées sur le banc. L'outil mis au point au SPF est unique au monde dans son fonctionnement ; et la comparaison des mesures réalisées en 2003 sera très précieuse pour évaluer la qualité des installations sur le marché. Actuellement on ne peut pas dire si l'intégration du brûleur à gaz dans la cuve procure une amélioration des performances ou pas. Les premiers résultats des mesures de 2003 seront fournis en 2004 et le contexte de la coopération internationale dans la nouvelle Tâche 32 **Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings** du Programme SH&C de l'AIE, notamment, sera important pour valoriser ces résultats [2].

3. La Tâche 26 **Solar Combisystems** du Programme SH&C de l'AIE, que nous avons imaginée en 1999, s'est achevée au début de 2003. 50 chercheurs et industriels de 10 pays y ont collaboré. Le principal résultat est un manuel pour l'étude et le dimensionnement des systèmes combinés, publié en fin 2003 chez James & James, sous le titre *Solar heating systems for Houses – A design handbook for solar combisystems*, soit 300 pages représentant 20 ans d'expériences internationales dans le domaine. C'est une contribution majeure au développement de la technologie solaire pour la satisfaction d'une partie des besoins en chaleur des maisons. La Tâche 26 a été présentée

dans nombre de conférences internationales depuis 1999, dont en Suisse Cisbat 2003. Le site Internet propose tous les rapports que l'on peut télécharger (www.iea-shc.org/task26/) [8].

4. Toujours dans le cadre de cette Tâche 26, l'équipe de recherche IA/EPFL & LESBAT/EIVD a analysé un système combiné du marché *in situ* et en laboratoire [5a, 5b]. Les résultats finaux publiés en 2003 montrent que, dans le cas d'une installation combinée de type Arpège, le gain apporté par la régulation prévisionnelle optimale par rapport à la régulation déjà sophistiquée mise en place par le constructeur serait de l'ordre de 10% sur une année, soit un peu moins que lors des premières simulations. Pour arriver à ce gain (3 points dans le cas d'un apport solaire de 30%), le surcoût du régulateur est difficile à justifier. Il est vraisemblable que les retombées du projet seront donc dans l'intégration progressive des méthodes développées dans le projet de recherche, le marché suisse actuel paraissant trop petit pour que le développement d'une régulation avancée dédiée au solaire puisse intéresser un industriel. Cependant, des contacts ont été initiés dans ce sens, et le projet se poursuit au stade P+D. Un développement de la régulation optimale a été poursuivi par l'IA/EPFL à la suite du projet solaire, pour les installations de chauffage

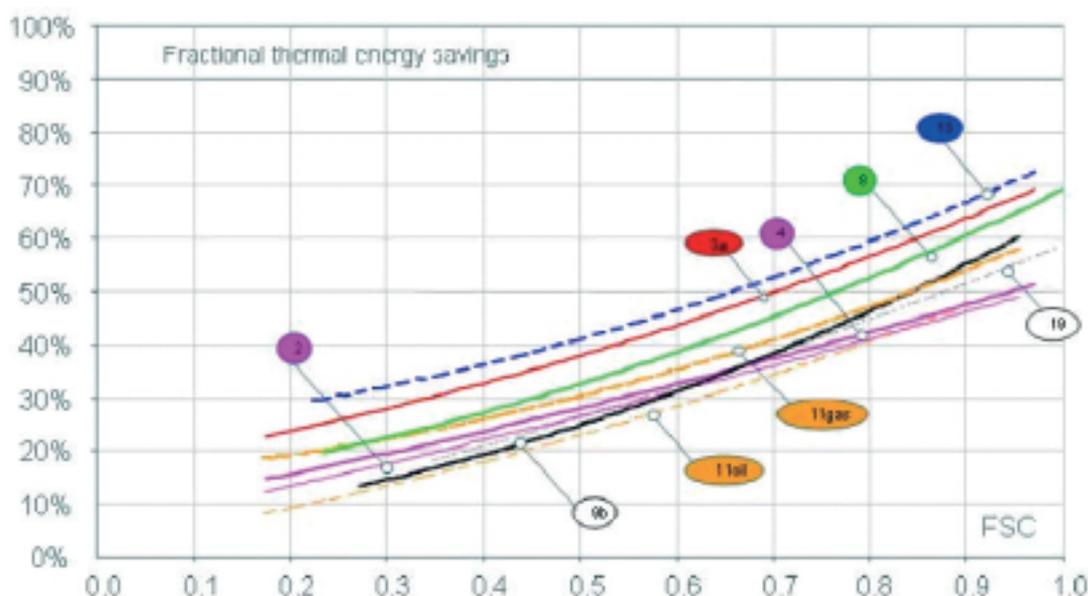


Figure 5 : la nouvelle méthode SFC a permis de comparer les 9 systèmes présentés par 9 pays dans la Tâche 26 du Programme SH&C de l'AIE. De fortes variations de performances selon les systèmes, à surface de capteurs pourtant identiques, sont observées. Le meilleur système reste le meilleur sur toute la plage de variation des surfaces de capteurs et de volume de stockage.

classique des bâtiments de la Ville de Lausanne pour lesquels des économies substantielles (15 à 20%) pourraient être réalisées [21].

PRODUCTION DE HAUTE TEMPÉRATURE ET D'ÉLECTRICITÉ

Centrale solaire pilote de 10 kWe SPS [6, 7]

Le principe de production de kWh électrique par une installation à capteur solaire à concentration et unité thermodynamique à cycle de Rankine a été prouvé en 2001 par l'équipe Cogener & LENI/EPFL à Lausanne.

Le CEP (capteur extra plat à concentration) a dû subir une transformation en 2003. Le tube initialement fourni par Solel d'Israël était d'un trop gros diamètre et trop inerte pour notre taille d'unité. Un nouveau collecteur sans vide mais avec un CPC a été développé par Cogener. Les mesures ont cependant montré que la réalisation doit être encore nettement améliorée pour atteindre l'objectif nécessaire (rendement de 50% à 160 °C).

La modélisation du CEP a été réalisée à l'aide du programme de *ray-tracing* RADIANCE afin de connaître précisément la distribution du rayonnement sur le tube collecteur. Le modèle donne des indications, mais reste encore à valider par des mesures de tache focale en cours. Les transferts thermiques internes au tube ont été approchés par le logiciel CFD FLUENT, afin de déterminer les pertes thermiques du tube et d'essayer de les ré-

duire. Le couplage des 2 modèles RADIANCE et FLUENT au travers du logiciel MATLAB sera réalisé en 2004.

En ce qui concerne l'unité ORC, elle a été testée en intérieur en simulant l'apport solaire par une boucle d'huile chaude. Les échangeurs ont été caractérisés en détail en fonction du taux d'huile dans le gaz ; et le réfrigérant R245fa, qui remplace désormais le R123, a pu être testé. Des capteurs de pression complémentaires ont été installés pour préciser le fonctionnement de détail des 2 cycles de Rankine superposés.

Un des défis du projet est la conception d'une pompe à réfrigérant montée sur le même arbre que la turbine, dans le but d'aboutir à une unité la plus compacte possible. La collaboration avec la société Merminod engineering a permis d'aboutir à un projet tenant compte de la faible viscosité du réfrigérant, du fonctionnement à la courbe de saturation et de la séparation des fluides de travail et de lubrification. Cela nécessite des matériaux spéciaux (pistons en alumine, traitement de surface sur les paliers), mais à un coût supportable en cas de production en série. 70% des pièces ont été usinées à fin 2003. 2004 verra les essais de cet ensemble totalement nouveau, sur le banc test que constitue l'unité ORC fortement instrumentée [6].

Le capteur CEP avec un tube focal de conception suisse n'est pas encore totalement au point. Néanmoins nous avons lancé des recherches de partenariat pour des projets de production

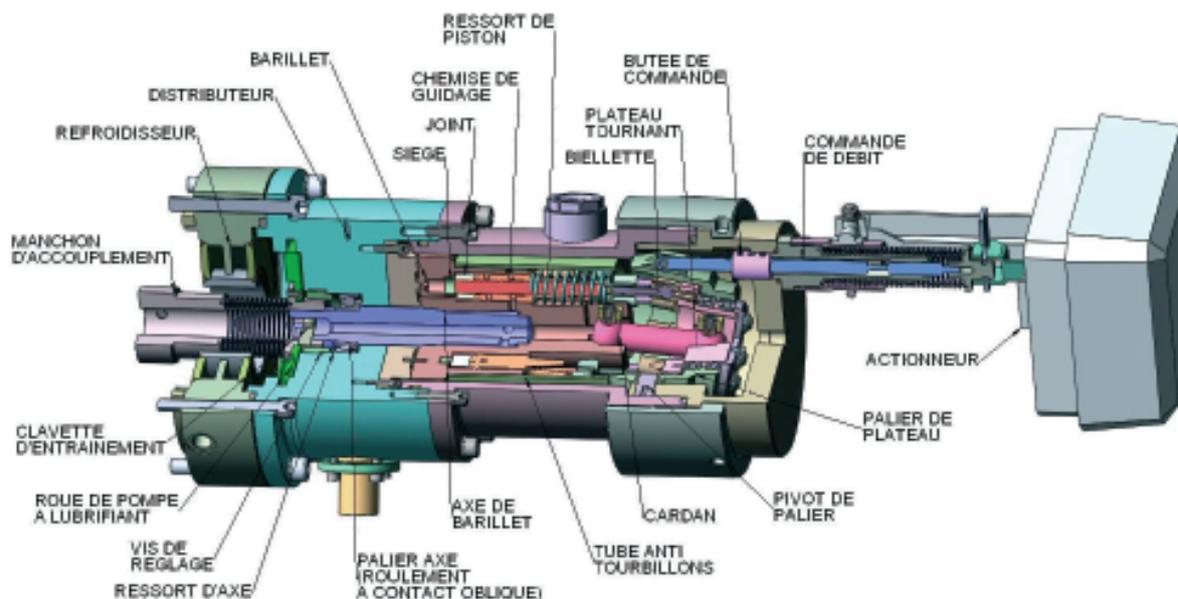


Figure 6 : ensemble turbine-pompe conçu pour une plus grande compacité et une plus grande fiabilité (3'000 t/min) par Merminod Engineering pour le projet SPS

d'énergie à moyenne température. Des contacts ont été initiés par Cogener pour un projet à Bâle qui a été abandonné, faute de site adéquat, et pour un projet en Australie qui est en cours d'analyse. En outre, il avait été envisagé de céder les deux lignes de capteurs CEP, d'une ancienne conception, à une unité de recherche en Tunisie ou à un projet pilote. Ce dernier pourrait voir le jour en 2004 pour un industriel suisse intéressé par une production de chaleur solaire à 140 °C. Cette application pourrait en outre être une contribution suisse à la nouvelle Tâche 33 **Solar heat for industrial processes** du Programme SH&C de l'AIE, qui a débuté en 2003.

STOCKAGE SAISONNIER DE CHALEUR

Optimisation d'installation et outils de simulation

La valorisation des mesures du projet **Serso** – un pont sur autoroute, à Därlingen, chauffé en hiver par un stock souterrain de 46'000 m³ et chargé en été par la chaussée munie de tubes – a commencé. Les mesures ont été complées par interpolation afin de faciliter la comparaison avec les simulations à venir [16].

Dans notre programme, l'exploitation des mesures sur des projets P+D passent non seulement par une analyse fine des résultats, mais aussi par une simulation comparée. C'est la seule solution pour pouvoir généraliser les résultats observés de manière fiable. Les mesures du projet pilote **Wollerau** (36 sondes de 120 m) ont pu être exploitées au LEEE de la SUPSI à Trevano/Canobbio. Un modèle de l'installation dans TRNSYS comprenant tous les composants de l'installation (bâtiment, pompe à chaleur, machine frigorifique, stock souterrain, tuyaux de connexion) a été élaboré sur la base de tous les travaux antérieurs menés par ce laboratoire [15]. Les résultats sont très éclairants pour tous les stocks souterrains de chaleur ou de froid, tel celui de la CNA/SUVA à Root :

- Tout d'abord dans le cas de l'installation de Wollerau, une simulation validée avec les énergies (chaud et froid) de dimensionnement (350 MWh/an, et 85 MWh/an pour le froid) montrent que le système était correctement dimensionné. Mais, avec les valeurs observées lors de l'année de mesures (470 MWh/an, et 75 MWh/an pour le froid), les températures dans le stock peuvent descendre sous la barre des 0 °C après 5 ans d'exploitation identique, situation jugée dangereuse. Cela devra être suivi attentivement par l'exploitant, selon les aléas climatiques été/hiver ; et, au besoin, la

sollicitation du stock en hiver devra être diminuée. L'efficacité globale du système, y compris le chauffage et le refroidissement (le *COP total*), a été de 3,3 ; c'est un très bon résultat. Avec les valeurs de *design*, ce même COP simulé se monte à 3,2.

- Les valeurs de puissance et énergie spécifiques relevées sont, dans le cas de Wollerau :
 - 60 kWh/m de sonde/an et 40 W/m en moyenne en extraction de chaleur (hiver) par la pompe à chaleur,
 - 20-35 kWh/m de sonde/an et 10-13 W/m en moyenne en injection de chaleur (été), avec une valeur de pointe de 40-50 W/m, et cela dans le cas du refroidissement direct, sans usage d'une machine frigorifique (le stock doit donc rester *froid* pour satisfaire la demande tout l'été),
 - 54 kWh/m de sonde/an et 16 W/m en moyenne en injection de chaleur (été), avec une valeur de pointe de 60 W/m, cela dans le cas du refroidissement direct avec appoint par machine frigorifique.
- La généralisation, grâce à l'étude de sensibilité faite avec le modèle validé, a livré des résultats fondamentaux pour cette technologie de stockage. En résumé :
 - Le bon fonctionnement dépend de paramètres dits d'intégration (intégration du stock dans un concept global optimal pour tout niveau de température – théorie du pincement) et de paramètres de dimensionnement.
 - Les paramètres de projet sont déterminants pour les performances énergétiques, et les paramètres de dimensionnement déterminent la viabilité à long terme du stock saisonnier.
 - Sans mouvement d'eau souterraine, les effets à long terme sur le stock sont directement liés à l'équilibre entre l'extraction de chaleur en hiver et la réinjection en été. Il est donc fondamental d'estimer le plus exactement les futures demandes de chaud et de froid d'un bâtiment lors du projet.
 - Trois ratios ont été mis en évidence (figure 7) :

Si les **besoins en froid (demande du bâtiment) sont compris entre 20% et 50% des besoins en chaleur** (du bâtiment), le refroidissement direct par le stock, sans machine frigorifique en appoint de froid,

est possible toute l'année. En dessous, la demande de froid est trop faible et la recharge estivale du stock ne se fera pas, la température moyenne du stock allant diminuer au cours des années, entraînant une baisse de performances de la pompe à chaleur en hiver.

Si les besoins en froid sont compris entre **50% et 65%** des besoins en chaleur, alors une machine frigorifique est nécessaire pour couvrir (partiellement) la totalité des besoins de froid ; mais le mode refroidissement direct par le stock restera prépondérant en termes de part de couverture des besoins en froid.

Si les besoins en froid **dépassent 65%** des besoins en chaleur, la température moyenne du stock va monter au cours des années, et, en conséquence, la part des besoins en froid couverte par le refroidissement direct va diminuer au cours des années. L'efficacité globale va baisser et il n'y a plus vraiment stockage de froid. La machine frigorifique sera de plus en plus sollicitée au cours des années.

Le projet P+D de Wollerau, commencé en 1998, se termine par un important travail de grande qualité qui mériterait une diffusion nationale

large dans les milieux des ingénieurs ainsi qu'une publication scientifique internationale.

Nouveau dimensionnement d'un stock journalier

Le projet *déphaseur thermique diffusif* a une originalité très forte. Au CUEPE de l'Université de Genève il a été découvert qu'un certain dimensionnement d'un stockage de chaleur permettrait un déphasage de 12 heures avec un faible amortissement. Cette propriété n'était pas décrite dans la littérature selon les recherches effectuées par le CUEPE. En 2003, les résultats suivants ont été obtenus [17] :

- Un modèle simplifié a permis d'identifier les paramètres du déphasage et de l'amortissement. La relation entre le débit d'air et la taille du stock optimal a pu être dérivée. Les limites du modèle simplifié ont été évaluées avec un modèle complexe
- Le déphasage de l'onde thermique journalière a été testé expérimentalement sur 2 prototypes de 1 m et 2 m de longueur, en section de 8 cm x 30 cm et de 50 cm x 50 cm en billes de terre cuite, gravier et planelles de terre cuite. Le dimensionnement de 1 m³ de matière pour un débit d'air de transfert de 10 m³/h a été vérifié. Les résultats confirment également les

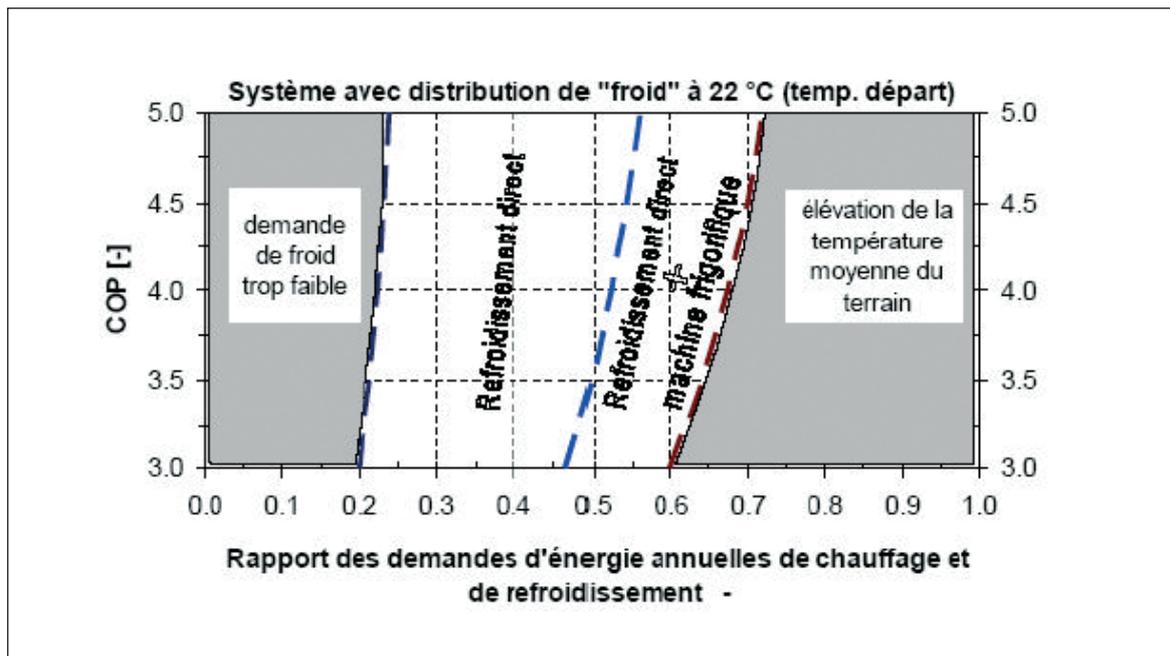


Figure 7 : les plages de dimensionnement possible d'un stock saisonnier pour satisfaire les besoins en chaleur en hiver et en refroidissement en été, tout en restant en régime permanent au cours des années d'exploitation (sans se réchauffer, sans se refroidir)

modèles analytiques pour toutes les harmoniques principales, mais une forte dépendance du calage au coefficient d'échange convectif air/stock est observée ; cela nécessitera encore des investigations expérimentales spécifiques en 2004.

- Il a été réalisé expérimentalement un déphaseur de 10 heures avec un amortissement de 70%, plus important qu'escompté, ce qui pourrait être expliqué par un coefficient de transfert convectif à la paroi d'échange plus faible qu'attendu théoriquement. Le travail sur ce coefficient est donc d'autant plus important pour la suite du projet.

Projets pilote et démonstration

Le grand projet de stockage saisonnier (49 sondes de 160 m de profondeur) de la **CNA/SUVA** à Root (Lucerne) est en fonction depuis l'été 2003, les premiers bâtiments de l'étape 1 (environ 25% du total prévu) commençant à être loués [19]. Le système de mesures a été installé et testé avec succès par le bureau Berchtold. Le suivi de l'installation à distance est possible grâce à des systèmes de mesures. Les premières mesures de 10 tem-

pératures dans le stock depuis septembre 2003 montrent que la zone périphérique est sollicitée par la pompe à chaleur plus rapidement que le cœur du stock. Un gradient vers l'intérieur du stock se crée, ce qui est conforme à l'attente. La zone externe a perdu en moyenne, dès 40 m de profondeur, 1 K en 2 mois et le cœur seulement 0,5 K. Nous attendons beaucoup de ce projet d'une grande ampleur au point de vue des économies d'énergie possibles grâce au stockage de chaleur solaire ; et 2004 nous fournira le 1^{er} bilan annuel.

Dans le projet **CostEAU**, une solution nouvelle pour le chauffage et le rafraîchissement a été réalisée par la société Ecoconfort (Préverenges, VD) à Satigny (GE), avec un collecteur terrestre horizontal non pas à air, mais à eau. Le rapport final montre l'intérêt d'une telle solution du point de vue énergétique, ses limites et les améliorations proposées pour de nouvelles installations. Le rapport est également une source importante d'information pour le dimensionnement des puits canadiens [20].

Le groupe d'étude du stockage saisonnier diffusif de ZHW, à Winterthur, a réussi en 2002 à trouver

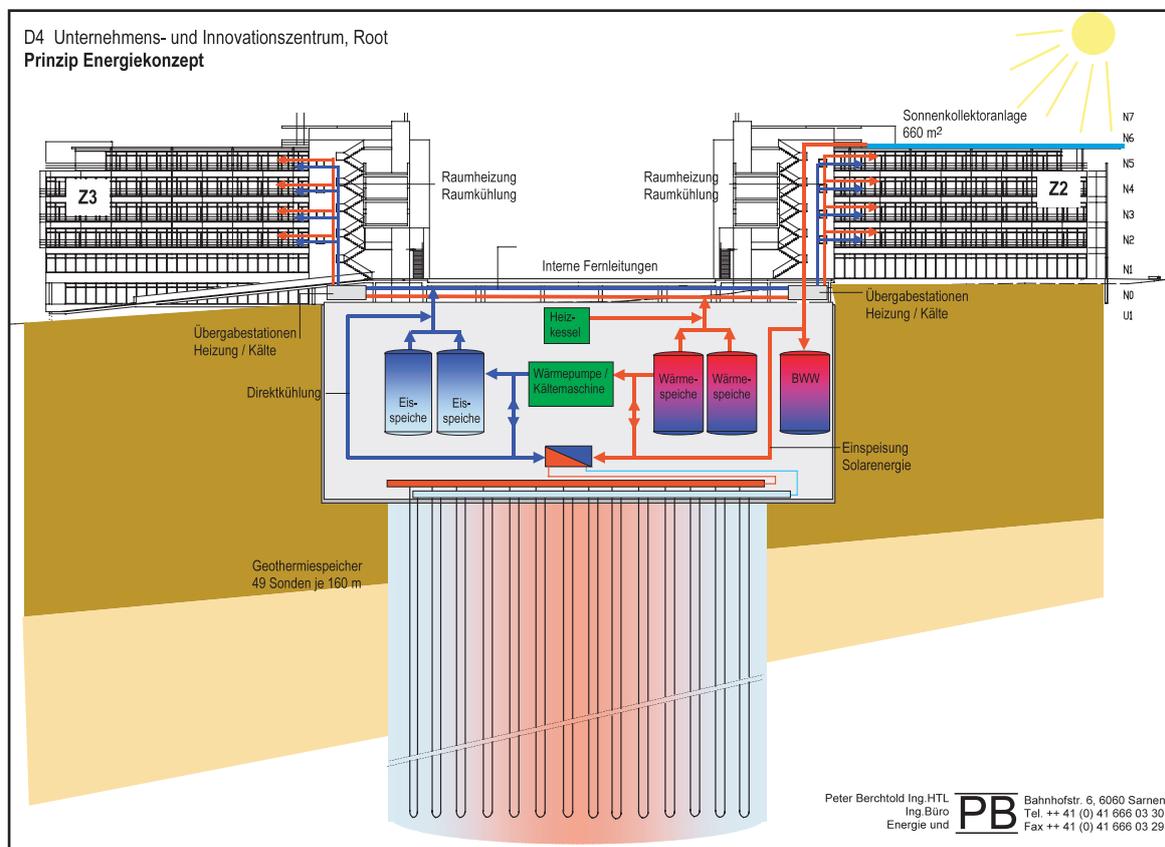


Figure 8 : l'installation solaire+stockage+pompe à chaleur de la CNA/SUVA à Root est en fonction depuis septembre 2003

un projet d'ampleur susceptible d'être chauffé par le solaire avec un stockage saisonnier de grande taille. Le projet Heumatt, une rénovation Minergie de la ville de Zürich, devant être réalisé en 2004, a été étudié afin d'évaluer la faisabilité d'un projet solaire permettant d'atteindre 50% de couverture solaire pour plus de 140 logements locatifs. Un avant-projet détaillé a été élaboré et une simulation prévisionnelle complète a été effectuée avec TRNSYS. Il s'est avéré que le projet était techniquement possible : la demande de 1'000 MWh/an pouvait être couverte à 48% par 1'870 m² de capteurs vitrés et un stock en terre de 8'500 m³ isolé tout autour, de manière similaire au stock de Vulruz, réalisé en 1981 et toujours en fonction. Un stock tampon de 144 m³ a été calculé à l'optimum dans la variante maximale à 50% de part solaire (le défi est de réaliser un système sans pompe à chaleur).

Les investissements nécessaires ont été chiffrés au niveau de l'étude préliminaire à 3,7 MCHF et après étude de détail sur le projet réel à 5, 7 MCHF, ce qui portait le coût par logement à 28 kCHF. Ce coût a été jugé trop élevé par le groupe d'accompagnement de projets, et malgré des efforts pour réduire la taille du projet et donc la couverture solaire, il a été considéré que le cas d'une rénovation et non d'une construction neuve, dans un environnement urbain, et à Zürich, n'était pas suffisamment favorable pour que le risque financier soit pris. L'option solaire du projet n'a donc pas été prise, illustrant la difficulté de réaliser du solaire en grand en milieu construit. En l'absence de réseau de chaleur à basse température, comme on les rencontre en Allemagne, cela prêterait les chances de construire des installations solaires thermiques de grande ampleur, sauf à être impliqué très tôt dans un projet d'habitat neuf, groupé ou collectif.

Une analyse des coûts par élément de construction et une analyse originale des risques ont été menées dans ce projet et peuvent être considérées comme une méthodologie à suivre dans tout projet. Le rapport final décrit en détail les résultats et les méthodes [14].

STOCKAGE DENSE DE CHALEUR POUR L'HABITAT

Stockage par procédé de sorption

Le SPF teste depuis 2002, 2 matériaux pour le stockage de chaleur solaire : la zéolithe et le silica-gel (Uetikon 720). Un prototype de système fermé à stocks à 2 cuves (une pour 35 L de matériau, une autre pour 24 L d'eau) sous vide a été réalisé, avec un échangeur spécial à spirale de

1,8 m². Même à 120 °C, ces 2 matériaux ont été décevants en terme de capacité de stockage et de facilité de déstockage. La densité globale de stockage atteinte est nettement plus faible qu'espérée (106 au lieu de 150 kWh/m³). Les données de la littérature semblent optimistes et les auteurs ne semblent pas avoir réellement testé les matériaux comme nous l'avons fait. Les pertes de charge dans le lit de silica-gel ont été aussi étudiées selon le débit de fluide et la taille des particules. La phase I de l'étude de ces matériaux s'est achevée en mars 2003 [13a].

L'intérêt du stock par sorption pour le stockage de chaleur et de froid a été relevé. Il faut à l'avenir repenser le système pour accomplir les 2 fonctions.

Une seconde phase a démarré en 2003. Le *design* du module complet de stockage par sorption a été réadapté au couple méthanol-charbon actif et a été réalisé. L'échangeur est le point le plus difficile. Un premier prototype de 1,8 m² en spirale est en cours de tests. Ce projet représente la Suisse dans la sous-tâche B de la Tâche 32 **Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings** du Programme SH&C de l'AIE [13b]. L'échange d'expériences au niveau international sera très profitable au projet suisse.

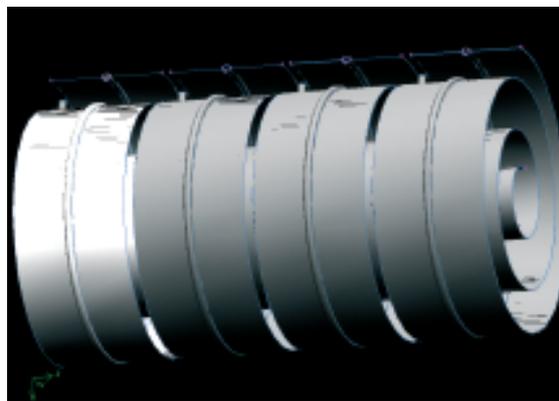


Figure 9 : l'échangeur «solaire-stock» en spirale pour le nouveau prototype de stockage par sorption

Stockage avec matériaux à changement de phase (PCM)

Un nouveau projet a débuté en 2003 : il s'agit du projet CoSpy-PCM mené par le LESBAT de l'EIVD, à Yverdon. Il consiste à rechercher la meilleure solution pour améliorer la densité du stock d'un système combiné, actuellement sous forme de cuve à eau généralement de 1 m³, au moyen de matériau à changement de phase. Ce matériau peut

être placé dans la cuve à différentes hauteurs et en différentes quantités. Les travaux ont consisté en automne 2003 à analyser les modèles numériques existants pour le stockage, avec ou sans PCM, dans le logiciel TRNSYS, et à élaborer différents concepts pour la combinaison stock d'eau & PCM sur un combi-système Arpège d'Agena,

utilisé préalablement pour d'autres travaux. Ce projet représente la Suisse dans la sous-tâche C de la Tâche 32. L'échange d'expériences au niveau international est, là encore, déterminant, car différents pays ont une certaine avance dans ce domaine de recherche, sans toutefois pour le moment observer des percées commerciales [18].

Collaboration nationale

Les pôles de compétences de notre programme restent en 2003 : le SPF pour les tests de matériaux, des capteurs, des stocks et de systèmes, le LENI-Cogener pour le développement de la production d'électricité par voie thermique, et le LEEE pour le stockage saisonnier diffusif.

La collaboration entre le SPF et l'industrie solaire suisse et étrangère est toujours forte.

Nous ouvrons un pôle en stockage PCM à l'EIVD d'Yverdon, activité connexe aux travaux sur les *slurries* froids que mène l'EIVD depuis plusieurs années, et les travaux de stockage par sorption sont accomplis au SPF.

Plusieurs des projets de notre programme ont été présentés à CISBAT 2003.

Collaboration internationale

Le SPF est membre de groupe de normalisation européenne (TC312) et certifié DIN. Cependant, la normalisation européenne n'est pas contraignante : dans certains pays (France, Espagne, Allemagne), il est exigé une certification nationale, ce qui défavorise notre industrie en obligeant à patienter et à refaire des tests de capteurs.

Le SPF met en place des collaborations bilatérales, par exemple, avec le DTU au Danemark pour être le plus efficace possible, par opposition aux projets mastodontes qu'impose désormais le 6^e PCRDT de l'UE.

Nos groupes de recherche en solaire sont engagés dans 3 tâches AIE : la Tâche 26 (SPF, Suter Consulting, EIVD) qui s'est terminée en 2003, la Tâche 27 (SPF) qui se poursuit encore 2 ans, et dans la nouvelle Tâche 32 (SPF, EIVD, *et al.*) que nous dirigerons comme Agent exécutif mandaté par l'OFEN.

Cette nouvelle Tâche 32 du Programme SH&C de l'AIE s'intitule **Advanced storage concepts for solar buildings**. Les travaux ont débuté par le recensement des projets en cours en Allemagne, Hollande, Danemark, Suède, Suisse, France, Espagne, en matière de stockage solaire avancé. Un document de synthèse sur l'état de l'art dans le domaine du stockage pour les maisons solaires a été démarré et devrait être produit par la Tâche en 2004.

Il s'avère difficile de mobiliser des financements dans la plupart des pays pour des projets AIE. Nous avons orienté dans notre programme 3 projets pour cette tâche : un au SPF sur l'amélioration des stocks à eau, un au SPF sur les stocks à sorption, un à l'EIVD sur les stocks avec matériau à changement de phase. Un autre projet proposé par l'EIVD avec une façade à PCM a été refusé, un projet du LFEM/EMPA, en discussion, sur le stockage par NaOH devrait en outre se joindre à nos efforts dans le domaine en 2004.

Le LESO collabore 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*) dans lequel on trouve également le SPF et Planair pour la Suisse et des partenaires de France, Espagne, Slovénie, et Allemagne. Ce projet est issu en partie des idées testées par Planair sur un ancien projet P+D de notre programme (PSD à Boudry en 1997). Il est aussi intéressant de pouvoir tester l'idée d'absorbeurs de couleur parallèlement au développement d'un verre solaire de couleur poursuivi par le LESO.

Dans le projet SoDa, Meteotest faisait partie d'un groupe de 11 partenaires européens. Un tel projet est impossible à mener au seul niveau national. Il permet l'échange de méthodes qui sont ensuite en partie utilisées au niveau national (par exemple, dans Meteororm), même si le projet de recherche lui-même n'a pas de poursuite directe.

Projets pilotes et de démonstration *Solaire actif – chaleur*

(contribution de Pierre Renaud, chef du programme P+D)

Le projet **ACCADUEO** [23] a montré la fiabilité du concept drain-back (circuit capteurs à vidange automatique) pour un champ de capteurs de l'ordre $2 \times 18 \text{ m}^2$ et fonctionnant sans antigel. Dans cette installation combinée eau chaude – chauffage, une énergie captée de l'ordre $600 \text{ kWh/m}^2\text{an}$ est remarquable. De plus, dans les tubes des absorbeurs de l'un des deux champs, des *turbulateurs* (chicanes insérées pour accroître la turbulence) augmentent l'énergie captée jusqu'à $660 \text{ kWh/m}^2\text{an}$, soit 20% de plus que le champ de capteurs sans turbulateurs.

Au terme du projet **Qualitätssicherungssystem** [24], les possibilités et les limites d'une méthode de détection des dérives de performances (appelée *méthode spectrale*) ont été établies par de nombreuses mesures sur deux installations solaires. Cette méthode permet de détecter à temps, dans le circuit capteurs, l'apparition de phénomènes réduisant progressivement les performances. En combinaison avec la logique de détection de dysfonctionnements développée dans le projet **Régulateur intelligent** [34], l'implémentation de cette méthode dans des régulateurs du commerce offrira une garantie de performances et accroîtra significativement la confiance des investisseurs potentiels dans le solaire thermique.

Les installations de production de froid à absorption, alimentées en chaleur par des capteurs plans

(avec chaudière à gaz en appoint) (**Berner Kantonalbank (BEKB) - Thun** [31]), respectivement avec des capteurs tubulaires sous vide (**Migros-Genossenschafts-Bund (MGB) - Zürich** [33]) ont été mises en service avec succès en 2003. Des mesures de performances sont en cours.

Les projets analysés et acceptés en 2003 concernent notamment :

- La poursuite du développement et la démonstration de systèmes drain-back (**Solmat** [40]).
- L'assainissement de la production de chaleur d'une coopérative d'habitations et en particulier le remplacement de la distribution de l'eau chaude produite de manière centralisée par une production solaire décentralisée (**Ge-meinnützige Baugenossenschaft Zürich 7 (GBZ 7)** [38]).
- La problématique du mode d'intégration du solaire thermique dans des lotissements neufs ou existants, la comparaison des variantes et l'élaboration des lignes directrices pour le choix, abordées dans le cadre du projet **Entscheidungsgrundlagen für Warmwasser-aufbereitungskonzepte** [41].
- L'évaluation de systèmes de production de chaleur et d'électricité, pour des bâtiments isolés, comprenant solaire thermique, solaire photovoltaïque, et groupe de cogénération



Figure 10 : Banque Cantonale Bernoise à Thounne : 100 m² de capteurs en toiture (à gauche) et 2 machines frigorifiques à absorption (couple H₂O–LiBr) de 46 kWfroid chacune (à droite)

alimenté en gaz liquide ; la conception et la régulation optimales du système sont deux aspects importants de ce projet (**Hybride autonome Energieversorgung - Veytaux** [39]).

- L'application, dans un camping valaisan, d'absorbants non-vitrés (toiture solaire) pour le chauffage de la piscine et de l'eau chaude de deux locaux sanitaires (**Camping du Botza** [35]).

Liste des projets de R+D

(RA) Rapport annuel 2003 existant

(RF) Rapport final existant ; (RI) Rapport intermédiaire existant

ENET: numéro de commande du rapport chez ENET

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

- [1] A. Bohren, U. Frei, SPF/HS Rapperswil: **SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie, Teil A : Komponenten in solarthermischen Systemen** (RA 2003) www.solarenergy.ch/.
- [2] P. Vogelsanger, T. Reichel, M. Haller, U. Frei, SPF/HS Rapperswil: **SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie, Teil B : thermische Solarsysteme** (RA 2003) www.solarenergy.ch/.
- [3] S. Brunold, U. Frei, SPF/HS Rapperswil: **SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie, Teil C: Materialien in thermischen Systemen** (RA 2003) www.solarenergy.ch/.
- [4] S. von Rotz, R. Chrenko, J. Marti, U. Frei, SPF/HS Rapperswil: **SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie, Teil D: Informatik** (RA 2003) www.solarenergy.ch/.
- [5a] T. Pittet, Ph. Dind, Laboratoire d'énergétique solaire de l'EIVD, Yverdon: **Optimisation d'installations solaires combinées** (RA juillet 2003) <http://igt.eivd.ch/lesbat/default.htm>.
- [5b] T. Prud'homme, Thèse n° 2591 (2002), EPF Lausanne: **Commande optimale d'une classe de systèmes hybrides ; application aux kits solaires de production d'eau chaude sanitaire** (RF 2003, Thèse) <http://iawwww.epfl.ch/>.
- [6] P.-A. Giroud, B. Gay, D. Favrat, LENI, EPF Lausanne: **SPS : mini-centrale pilote électrothermo-solaire de 10 kWel Phase 5 : Développement du prototype industriel de l'unité ORC** (RA 2003) <http://leniwww.epfl.ch/publications>.
- [7a] C. Pécoud, R. Bréguet, Y. Allani, COGENER, Lausanne: **SPS : mini-centrale pilote électrothermo-solaire de 10 kWel – Phase 4 : Industrialisation du capteur CEP** (RI, 17 mars 2003) www.cogener.ch/sps_index.htm.
- [7b] Y. Allani, C. Pécoud, R. Bréguet, COGENER, Lausanne: **SPS : mini-centrale pilote électrothermo-solaire de 10 kWel – Phase 5 : Recherche d'amélioration du CEP et industrialisation** (RA 2003) www.cogener.ch/sps_index.htm.
- [8] J.-M. Suter, Suter Consulting, Berne: **IEA SH&C Task 26 Solarcombisystems – Participation and Subtask A leading** (RA 2003 et RF) www.iea-shc.org/task26/index.html www.energy-research.ch/.
- [9] J. Remund, S. Kunz, Meteotest, Berne: **METEONORM 5.0 – Édition 2003** (RF et CD 2003) www.meteotest.ch.
- [10a] A. Schüler, C. Roecker, J.-L. Scartezzini, LESO, EPF Lausanne: **Capteurs solaires en couleur – Phase I** – Décembre 2003 (RF) www.lesowww.epfl.ch/.
- [10b] A. Schüler, C. Roecker, J.-L. Scartezzini, LESO, EPF Lausanne: **Capteurs solaires en couleur – Phase II** (RA 2003) www.lesowww.epfl.ch/.
- [11] J. Remund et al., Meteotest, Berne: **Project SoDa : Integration and exploitation of networked solar radiation databases for environment monitoring** (RF 2003). www.soda-is.com/.

- [12] Y. Allani, C. Pécoud, COGENER, Lausanne: **SPS : prospection de projet en Australie** (RA 2003) www.cogener.ch.
- [13a] P. Gantenbein, S. Brunold, U. Frei, SPF/HS Rapperswil: **Sorptionsspeicher: Aufbau und Inbetriebnahme der Laboranlage** (RF, 31. März 2003) www.solarenergy.ch/.
- [13b] P. Gantenbein, S. Brunold, U. Frei, SPF/HS Rapperswil: **Sorptionsspeicher: Sorptionsmaterialien Studie Wärme- & Stoffaustausch** (RA 2003) www.solarenergy.ch/.
- [14] P. Hartmann, H. Juzi, W. Dubach, R. Wüthrich, ZHW, Winterthur: **Solare Wärmeversorgung mit saisonalem Speicher für die Wohnsiedlung Heumatt, Zürich Seebach** – Dezember 2003 (RF), ENET 230284, www.zhwin.ch/.
- [15] D. Pahud, SUPSI-DCT-LEEE, Canobbio: **Optimisation par simulation calée de l'installation de stockage de Wollerau** – Décembre 2003 (RF), ENET 230282 et 230283 (Annexe) www.lee.dct.supsi.ch/urec.htm.
- [16] 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 2003). www.lee.dct.supsi.ch/urec.htm
- [17] P. Hollmuller, B. Lachal, CUEPE, Université, Genève: **Déphaseur thermique diffusif** (RA 2003) www.unige.ch/cuepe.
- [18] S. Citherlet, J. Bony, EIVD/LESBAT, Yverdon: **CoSyPCM Combi-système avec Matériaux à changement de phase** (RA 2003) <http://igt.eivd.ch/lesbat/default.htm>.

Liste des projets P+D Stockage de chaleur

- [19] P. Berchtold, Saarnen: **Geothermiespeicher SUVA D4 Unternehmens- und Innovationszentrum, Root (LU)** (Projet P+DB) (RA 2003) www.aramis-research.ch/e/14779.html.
- [20] P. Hollmuller, B. Lachal, CUEPE, Université, Genève: **COSTEAU : Préchauffage et rafraîchissement par collecteurs souterrains à eau – Étude de cas (bâtiment Perret à Satigny, GE) et généralisation** (RF), Rapport de recherche du CUEPE n° 3, 2003, ENET 230288 www.unige.ch/cuepe/frameset.htm.
- [21] T. Prud'homme, D. Gillet, Laboratoire d'automatique, EPF Lausanne: Rapport final à l'intention des Services Industriels de la Ville de Lausanne, **Optimisation de la gestion d'installations de chauffage** (RF Juin 2003), ENET 230277, <http://iawwww.epfl.ch/>.

Liste des projets P+D Solaire actif – Chaleur

- [22] W. Roth, (werner.roth@es-basel.ch): **Solaranlage Hotel Bellevue, Hasliberg** (RF) www.solarch.ch.
- [23] B. Salerno, (info@sesolar.ch), SALERNO ENGELER GmbH, Langenbruck: **Drain-Back Solaranlage ACCADUEO, Waldenburg** (RF) www.solarch.ch.
- [24] U. Grossenbacher, (e-buero@sesamnet.ch), ENERGIEBÜRO GROSSENBACHER, Murten: **Qualitätssicherungssystem für Solaranlagen – Methode zur permanenten Funktionskontrolle thermischer Solaranlagen** (RF), ENET 230273 www.solarch.ch.
- [25] U. Frei, (ueli.frei@solarenergy.ch), HSR RAPPERSWIL - INSTITUT FÜR SOLARTECHNIK (SPF), Rapperswil: **Einsatz flexibler Verbindungsleitungen aus Kunststoff in der thermischen Solartechnik (FLEXTUBE)**.

- [26] U. Frei, (ueli.frei@solarenergy.ch), HSR RAPPERSWIL - INSTITUT FÜR SOLARTECHNIK (SPF), Rapperswil: **Prüfung von solaren Kombisystemen (KOMBI KOMPAKT+)**.
- [27] B. Salerno, (info@sesolar.ch), SALERNO ENGELER GmbH, Langenbruck: **Drain-Down-System für grosse Solaranlagen**.
- [28] U. Muntwyler, (muntwyler@solarcenter.ch), MUNTWYLER ENERGIETECHNIK AG, Zollikofen: **Drain-Back-Kompaktanlagen** (RA) www.solarch.ch.
- [29] R. Koen, JSP GREENPEACE CH, Bern: **JugendSolarProjekt, Solaranlage Kinderdorf Pestalozzi, Trogen**.
- [30] R. Koen, JSP GREENPEACE CH, Bern: **JugendSolarProjekt, Solaranlage Munt la Reita, Cimalmotto**.
- [31] C. Hilgenberg, (christian.hilgenberg@iem.ch), INGENIEURBÜRO IEM AG, Gwatt-Thun: **Solarbetriebene Absorptions-Kältemaschine mit Heizungsunterstützung Berner Kantonalbank (BEKB) – Thun** (RI) www.solarch.ch.
- [32] B. Sitzmann, (sitzmann@oekozentrum.ch), OEKOZENTRUM, Langenbruck: **Zirkulationseinbindung von solaren Warmwasseranlagen im MFH** (RA) www.solarch.ch.
- [33] F. Beuchat, (beuchat@rmb.ch), REUST MARTI + BEUCHAT AG, Zürich: **Solarbetriebene Absorptions-Kältemaschine Migros-Genossenschafts-Bund (MGB)-Zürich**.
- [34] C. Jobin, (agena.energies@bluewin.ch), AGENA ÉNERGIES SA, Moudon: **Détection des dysfonctionnements affectant les installations solaires pour l'eau chaude sanitaire et identification de leur origine** (RI) www.solarch.ch.
- [35] Y. Roulet, (roulet@energie-solaire.com), ÉNERGIE SOLAIRE SA, Sierre: **Camping du Botza : chauffage solaire de la piscine et de l'eau chaude** (RA) www.solarch.ch.
- [36] A. Messerli, (info@nena.ch), NEUENSCHWANDER-NEUTAIR AG, Bern: **Pfadiheim Weiermatt Köniz: Sanierung Wärmeversorgung** (RA) www.solarch.ch.
- [37] B. Sitzmann, (sitzmann@oekozentrum.ch), OEKOZENTRUM, Langenbruck: Kleinauftrag Präsentation Symposium Staffelstein **Solaranlageneinbindung via Warmwasserzirkulation**.
- [38] A. Primas, (aprimas@bhz.ch), BASLER & HOFMANN AG, Zürich: **Sanierung der Warmwasser-versorgung Gemeinnützige Baugenossenschaft Zürich 7 (GBZ 7)**.
- [39] U. Muntwyler, (info@solarcenter.ch), MUNTWYLER ENERGIETECHNIK AG, Zollikofen: **Hybride autonome Energieversorgung mit Photovoltaik, thermischen Sonnenkollektoren, Flüssiggas-Blockheizkraftwerk und Holz (Projekt Veytaux)**.
- [40] L. Engeler, (info@sesolar.ch), SALERNO ENGELER GmbH, Langenbruck: **Solmat frostschutzmittelfreie Warmwassererwärmung (Werkheim Sonnmatt – Langenbruck)**.
- [41] C. Fillieux, (chfillieux@bhz.ch), BASLER & HOFMANN AG, Zürich: **Entscheidungsgrundlagen für Warmwasseraufbereitungskonzepte unter Einbezug der optimalen Nutzung von Sonnenenergie**.

PHOTOVOLTAIK

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Stefan Nowak

stefan.nowak@netenergy.ch



5.5-kWp-Dachintegration Freestyle® mit Dünnschichtzellenmodulen
(PV Planer und Bildquelle: Solstis, Sàrl; Architekt: Frank Galifier)

Bei der Planung eines Einfamilienhauses in Lutry bei Lausanne wurde von Beginn an eine vollflächige Dachintegration der Photovoltaik-Anlage vorgesehen. Die Anlage ist integraler Bestandteil des Gebäudes und aus Sicht des Betrachters vom Boden aus nicht als solche erkennbar.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im Jahr 2003 konnten im Programm *Photovoltaik* (PV) umsetzungsorientierte Tätigkeiten weiter konsolidiert werden. Diese wurden einerseits in neuen Kooperationen mit der Industrie, sowie andererseits in der internationalen Zusammenarbeit intensiviert. Trotz eines stagnierenden nationalen Marktes und den Diskussionen rund um die Zukunft von EnergieSchweiz, war aus technologischer Sicht ein wachsendes Interesse in der Industrie zu verzeichnen. Damit setzte sich der Aufbau der Industriebasis fort. Das Programm verfolgte dabei weiterhin eine ausgeprägte internationale Ausrichtung. Laufende Aktivitäten in Forschung und Entwicklung sowie Pilot- und Demonstrationsanlagen umfassten im Berichtsjahr 2003 rund 85 Projekte, wobei alle bekannten Projekte mit einer Förderung der öffentlichen Hand berücksichtigt sind. Die Anzahl der Projekte und der Mitteleinsatz lagen in der Grössenordnung des Vorjahres.

Entsprechend dem von der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE genehmigten *Forschungskonzept Photovoltaik 2000 – 2003* [38] ist das Programm *Photovoltaik* in folgende Bereiche gegliedert:

Solarzellen der Zukunft

Die Arbeiten zu **Dünnschicht-Solarzellen** waren im Berichtsjahr fokussiert auf die Schwerpunkte **Silizium** (amorph, mikrokristallin), Zellen auf der Basis von **Verbindungshalbleitern** (CIGS) sowie **Farbstoffzellen**. Neue Produktionsprozesse standen besonders bei den Silizium Dünnschicht Solarzellen im Vordergrund. In allen Technologien fanden die Bestrebungen zur Umsetzung ihre Fortsetzung und neue wichtige Projekte konnten mit privaten Unternehmen konkretisiert werden.

Module und Gebäudeintegration

Die **Integration der Photovoltaik** im bebauten Raum bildete weiterhin den wichtigsten Schwerpunkt der angestrebten Anwendungen. Aktuell stehen die Produkte und Erfahrungen mit Dünnschicht Solarzellen in der Gebäudeintegration im Vordergrund. Für Solarmodule wurden Optimierungsaspekte in Hinsicht auf eine weitere Kos-

tenreduktion sowie neue industrielle Verfahren untersucht.

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. Die bessere Vorhersage des **Energieertrags** von Solarmodulen war ein Ziel, welches im Berichtsjahr mit Nachdruck verfolgt wurde. Die **Normen** für die Installation von netzgekoppelten PV-Anlagen standen für eine überfällige Überarbeitung an. Für **Inselanlagen** waren Speicherkonzepte und die Kombination mit anderen Energietechnologien von Bedeutung.

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 und ausgebaut wurde. Damit ist in wissenschaftlich-technischer Hinsicht ein guter Anschluss der Schweizer Photovoltaik an die internationale Entwicklung gewährleistet.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

ZELL-TECHNOLOGIE

Die **grosse Bandbreite der Schweizer Solarzellenforschung** konnte im Berichtsjahr 2003

dank der breiten Abstützung dieser Forschung mit Erfolg fortgesetzt werden. Verschiedene Grundlagenorientierte Arbeiten wurden im Programm *TOP NANO 21* des ETH-Rates durchgeführt. An-

dererseits wurden die Industrie-Projekte mit Unterstützung der KTI praxisorientiert weiterverfolgt. Der anhaltende Erfolg mit der Beteiligung an EU-Projekten belegt die internationale Konkurrenzfähigkeit der Schweizer Solarzellenforschung.

Dünnschicht Silizium

Das IMT an der Universität Neuchâtel befand sich im Berichtsjahr bei den **mikromorphen Solarzellen** [1a] in einer Übergangsphase: Übergang einerseits in eine wichtige Kooperation mit der Firma *Unaxis*, welche mit einer eigenen Geschäftseinheit *Unaxis solar* in Neuchâtel ein Industrielabor für Depositionsanlagen von Solarzellen aufbaut [39]; Übergang aber auch in Bezug auf den damit verbundenen Personalwechsel, welcher zudem durch die Berufung des Nachfolgers von Prof. A. Shah, Leiter der Forschungsgruppe, gekennzeichnet war; Übergang letztlich, was die kurz- und mittelfristige Ausrichtung der Forschung anbetrifft. Im Vordergrund der Arbeiten im Rahmen des BFE-Projektes stehen die Schlüsselfaktoren, welche die Führungsposition des IMT im wissenschaftlichen Umfeld des Dünnschichtsiliziums prägen. Dies betrifft die Depositionsgeschwindigkeit des mikrokristallinen Siliziums, die optische Absorption dieses Materials, sowie die transparenten Oxydschichten (TCO) zur optimalen Lichtstreuung. Die Kooperation mit der Spin-off Firma *VHF-Technologies* wurde in Hinsicht auf Solarzellen auf Kunststoff intensiviert. Die Resultate in den einzelnen Arbeitsbereichen können wie folgt zusammengefasst werden: Die Abscheiderate von mikrokristallinem Silizium in Solarzellenqualität konnte auf über 2.5 nm/s erhöht werden, Einfachzellen aus mikrokristallinem Silizium auf Glas erreichten bei moderaten Depositionsraten 7% Wirkungsgrad. Auf dem Kunststoff PET wurde für amorphes Silizium 7%, für mikrokristallines Silizium 5.2% Wirkungsgrad erreicht (n-i-p Einfachzellen), was für diese neue Materialkombination als ermutigend betrachtet werden kann.

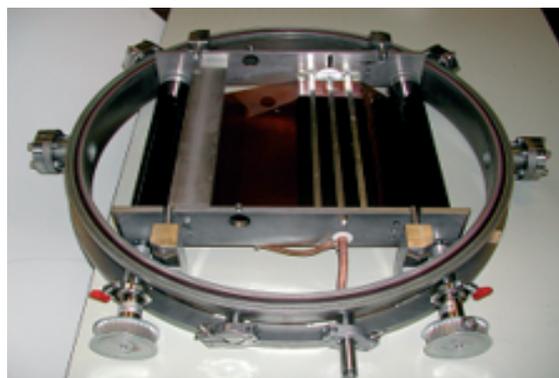


Figur 1: Industrielle Plasma KAI-Depositionsanlage (Bildquelle Unaxis)

Dabei kamen neue Konzepte zur Strukturierung des Substrates zur Anwendung. Mehr grundlagenorientiert wurde das Wachstum und die Struktur von mikrokristallinem Silizium untersucht; diese Arbeiten wurden an der 3rd World Conference on Photovoltaics in Osaka ausgezeichnet [40]. Das EU-Projekt **DOIT** [1b] zu weiteren Arbeiten an den mikromorphen Solarzellen wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Hier war das Gesamtziel ein mikromorphes Klein-Modul von 30x30 cm² mit einem stabilen Wirkungsgrad von 11%; die Hauptaufgabe des IMT bestand in diesem Zusammenhang in der Verwendung der VHF-Deposition für die grossflächige Abscheidung. Im Berichtsjahr zeigten sich im Reaktor Probleme, welche auf Sauerstoffkontamination zurückgeführt werden konnten und grosse Verzögerungen verursachten. Die Meilensteine von 7 bis 8% konnten deshalb noch nicht erreicht werden und es liegt ein bestes Zwischenresultat von 5.3% vor. Als Gesamtresultat wurde im internationalen Projekt ein stabiler Wirkungsgrad von 10% erreicht.

Im Industrieprojekt mit *Unaxis* sollen die KAI-Depositionsanlagen, welche für die Produktion von grossflächigen Flachbildschirmen zum Einsatz kommen (Fig. 1), in Hinsicht auf mikromorphe Solarzellen optimiert werden. Dies stellt ein sehr ambitioniertes Industrieprojekt dar, welches die Herstellung von Dünnschicht solarzellen revolutionieren könnte.

Das KTI-Projekt zwischen dem CRPP an der EPFL, dem IMT und *Unaxis* einer **grossflächigen, schnellen Beschichtungsanlage** [2] für Silizium-Dünnschicht solarzellen wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. In einem Einkammersystem von 1.4 x 0.7 m² Fläche konnten alle Projektziele im Zusammenhang mit einer stabilen amorphen p-i-n Solarzelle bei einer Depositionsrate von 3 Å/s erreicht werden. Dieses KTI-Projekt ist ebenfalls ein wichtiges Element des oben aufgeführten Technologie Transfers zu *Unaxis*.

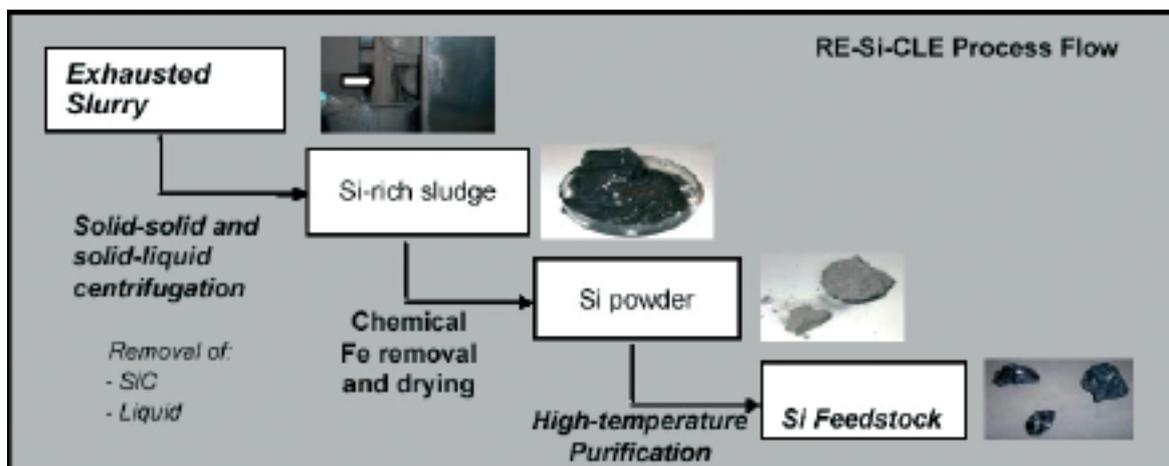


Figur 2: Versuchsanlage zur Aufrauung von Polyimidfolien (Bildquelle EIAJ)

Das Projekt für den effizienten Lichteinfang durch gezieltes **Aufrauen von Polymer Substraten** [3a] an der Fachhochschule in Le Locle (EIAJ) wurde im Berichtsjahr in Zusammenarbeit mit *VHF-Technologies* abgeschlossen. Reaktives Ionen-Ätzen mit SF_6/O_2 in einem roll-to-roll Prozess soll das Substrat so aufrauen (Fig. 2), dass durch Lichteinfang eine Erhöhung des Wirkungsgrades der amorphen Solarzellen erreicht wird. Die Rauigkeit der Polyimidsubstrate konnte gezielt verändert und der Wirkungsgrad damit um 10% erhöht werden. Auf diesem modifizierten Substrat konnte am IMT mit amorphem Silizium ein Anfangswirkungsgrad von 6.9% erreicht werden. In einem *TOP NANO 21* Projekt wurde in Zusammenarbeit mit *VHF-Technologies* die Herstellung zufälliger **Nanostrukturen auf Polymer Substraten** [3b] für den Lichteinfang untersucht.

Kristallines Silizium

HCT Shaping Systems beteiligt sich am EU-Projekt **RE-SI-CLE** [4] zur Erarbeitung von neuen Prozessen, welche die Rezylierung von Rohsilizium aus Siliziumabfällen der Verarbeitungskette für die Wiederverwendung im Produktionsprozess anstrebt. Dies erfolgt auf der Grundlage des knappen Rohmaterials für kristalline Silizium Solarzellen: Gegenwärtig gehen 34% des Siliziums für multikristalline Zellen im Produktionsprozess in Form von Siliziumpulver verloren. Dies entspricht 5.1 Tonnen Silizium pro MWp Modulproduktion. Aufgrund der Charakterisierung des beim Drahtsägen anfallenden Sägeschlammes, werden geeignete mechanische und chemische Extraktionstechnologien identifiziert und entwickelt (Fig 3).



Figur 3: Prozesskette zur Rezyklierung von Silizium (Bildquelle HCT Shaping Systems)

Dies soll durch reaktives Ionen-Ätzen und Aluminiumdeposition erzielt werden. Die Experimente wurden mit amorphen und nanokristallinen Siliziumschichten durchgeführt. Es konnten grundlegende Untersuchungen zur Diffusion von Aluminium und Aluminium induzierten Kristallisationsprozessen durchgeführt werden.

Ein neues Projekt bei *VHF-Technologies* [3c] hat die **Verbesserung der Zuverlässigkeit von amorphen Solarzellen auf Polymer-Substraten** zum Ziel. Dabei soll insbesondere die Adhäsion des metallischen Rückkontaktes auf Polyimid verbessert werden. Durch die gezielte Prozessoptimierung konnte in kurzer Zeit eine deutliche Verbesserung dieser Adhäsion und damit verbunden ein verbessertes Verhalten bei thermischen Zyklen erreicht werden.

II-VI Verbindungen (CIGS)

Die Gruppe Dünnschichtphysik an der ETHZ hat über Jahre EU-Projekte zum Thema Solarzellen auf der Basis von Verbindungshalbleitern (CIGS, CdTe) durchgeführt. Das EU-Projekt **PROCIS** [5a] wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. In diesem Projekt wurden produktionsrelevante Aspekte für CIGS-Zellen auf grösserer Fläche entwickelt. Die ETHZ Gruppe untersuchte dabei die Wachstumskinetik und die Mikrostruktur der CIGS-Schichten in Bezug auf den Einfluss von Natrium, welches die Materialeigenschaften günstig beeinflusst. Mittels unterschiedlicher Vakuumprozesse wurden CIGS-Solarzellen mit Pufferschichten hergestellt. Die Verwendung von nasschemischen Prozessen für eine CdS-Pufferschicht (14-15% Wirkungsgrad) ist jedoch den aufgedampften Schichten deut-

lich überlegen (10-12% Wirkungsgrad). Ebenso wurden mit ZnS- und ZnSe-Schichten weniger gute Resultate erzielt (ca. 9% Wirkungsgrad). Im EU-Projekt **NEBULES** [5b] wird das Thema neuer Pufferschichten für CIGS-Solarzellen weiter entwickelt. Hier konzentriert sich die ETHZ-Gruppe auf die strukturelle und elektronische Charakterisierung der Solarzellen. Zum Einen erlauben die durchgeführten Untersuchungen ein besseres Verständnis der Grenzflächen und damit der Unterschiede zwischen den verschiedenen obenerwähnten Verfahren. Zum Anderen werden neue Pufferschichten mit In_2S_3 untersucht. Damit konnten die Projektpartner 16.4% Wirkungsgrad erzielen. Im EU-Projekt **METAFLEX** [5c] soll ein *roll-to-roll* Produktionsprozess für flexible CIGS-Solarzellen entwickelt werden. Dabei konzentriert sich die ETHZ Gruppe auf die CIGS-Deposition auf Polyimid, Minimodule und die CIGS-Abscheidung bei Temperaturen unter 450 °C. Im Berichtsjahr stand die Herstellung des Polyimid-Substrates durch *spin coating* im Vordergrund. Bei der CIGS-Deposition wird aufgrund der Erfahrungen auf anderen Substraten Natrium eingebaut, wobei dazu eine spezielle Methode entwickelt wird. Es wurden bisher Wirkungsgrade bis zu 14.4% erzielt.

In einem Projekt im Rahmen von **TOP NANO 21** wurden neue Herstellungsprozesse für **CIGS-Zellen auf der Grundlage von Nanomaterialien** angestrebt [5d]. Durch die Verwendung geeigneter *Precursor*-Schichten in Prozessen ohne Vakuum kann eine Kostenreduktion erreicht werden. Die *Precursor*-Schicht wird in einer selenhaltigen Atmosphäre gesintert. Im Berichtsjahr wurde in der Strom-Spannungskennlinie ein Wirkungsgrad von 6.7% erreicht.

Farbstoffzellen

Die Entwicklung von farbstoffsensibilisierten, **nanokristallinen Solarzellen** [6a] wurde am ICMB der EPFL fortgesetzt. Im Berichtsjahr wurde die Farbstoffsynthese in Hinblick auf den möglichen Temperaturbereich vorangetrieben. Zusammen mit *Greatcell Solar* werden in einem **TOP NANO 21** Projekt [6b] **Innenraum-Anwendungen der Farbstoffzelle** entwickelt. Ein weiteres **TOP NANO 21** Projekt befasst sich mit **flexiblen Farbstoffzellen** [6c]. Im Vordergrund stehen als Substrat rostfreie Stahlfolien. Im EU-Projekt **NANO-MAX** [6d] sollen alternative Wege für die Farbstoff-Solarzelle untersucht werden, insbesondere mittels neuer Photoelektroden-Konzepte und -Materialien, neuer Farbstoffe, verbesserter Transporteigenschaften und reduzierter Rekombination der Ladungsträger. Damit werden Wirkungsgrade

von 12%, eine mögliche Extrapolation desselben auf 15% sowie 9% auf einer Fläche von 100 cm^2 angestrebt. Die EPFL Gruppe konzentriert ihre Arbeiten auf Variationen des verwendeten Farbstoffs.

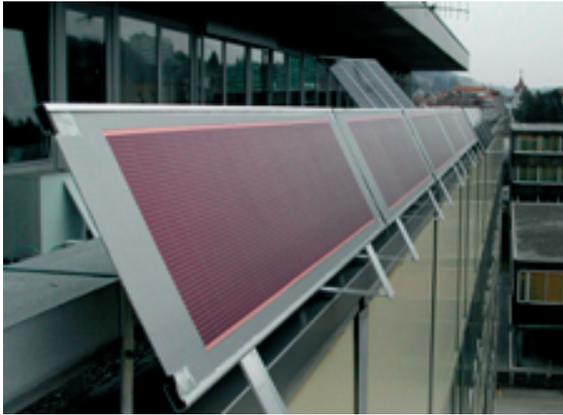
Antennen-Solarzellen

An der Universität Bern wurden die grundlegenden Arbeiten zu **Antennen-Solarzellen** [7] 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 in Hinblick auf die elektronische Energieübertragung.

SOLARMODULE UND GEBÄUDE-INTEGRATION

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 konnte (siehe auch Abschnitt P+D), verlagert sich die Entwicklung vermehrt auf das Solarmodul selbst. Ein spezieller Akzent wird auf die Entwicklung für die Integration von Dünnschicht-Solarzellen und deren Bedingungen gelegt. Schweizer Unternehmen beteiligen sich hier an verschiedenen neuen EU-Projekten.

Das KTI-Projekt für ein **PV-Komposit-Modul** [3d], an welchem *VHF-Technologies* und *Alcan Technology & Management* mit der Fachhochschule in Le Locle (EIAJ) zusammenarbeiten, wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. In diesem Projekt sollte auf der Basis von *Alucobond*[®], zusammen mit der amorphen Silizium-Solarzelle von *VHF-Technologies*, ein für gebäudeintegrierte Anwendungen geeignetes Solarmodul entwickelt werden. Ein Fabrikationsprozess für grossflächige Module und die notwendigen Technologien für die Laminierung konnten etabliert werden. Der stabilisierte Wirkungsgrad der Solarzellen konnte auf 4% erhöht werden und es wurde eine erste Serie von Prototypenmodulen hergestellt, welche in einem Aussentest geprüft werden (Fig. 4).



Figur 4: Erste Prototypen von Solarmodulen auf der Basis von Alucobond® und VHF-Technologies werden an der Fachhochschule in Le Locle getestet (Bildquelle EIA)

Swiss Sustainable Systems (3S) untersucht die durch den Einsatz von **antireflexgeätztem Glas** mögliche Leistungssteigerung [8a] von Solarmodulen. Erste Vergleichsmessungen bestätigen diese These. Ausserdem arbeitet 3S an verschiedenen EU-Projekten zur PV-Gebäudeintegration mit. Das EU-Projekt **HIPERB** [8b] für die Verwendung von CIGS-Zellen in Photovoltaik-Dach- und Fassadensystemen wurde im Berichtsjahr abgeschlossen (Fig. 5). Damit einhergehend findet die Weiterentwicklung des **Megaslate®** Systems statt. Es wurden verschiedene gebäudeintegrierte Versuchsaufbauten realisiert, welche in Hinsicht auf die TÜV-Zertifizierung geprüft werden. Im EU-Projekt **AFRODITE** [8c] werden unter Verwendung von rückkontaktierten, kristallinen Solarzellen neue, ästhetisch ansprechende Lösungen für die PV-Gebäudeintegration entwickelt. Diese werden nun für die Serienproduktion vorbereitet. 3S konzentrierte sich dabei auf die optimale Verschaltung der neuen Zellen.

Kurth Glas & Spiegel arbeitete am EU-Projekt **ADVANTAGE** [9], welches im Berichtsjahr abgeschlossen wurde. Kurth Glas & Spiegel widmete sich hier der Entwicklung von Solarmodulen mit Leiterbahnen auf Glas, d.h. Module ohne Verwendung einer Ethyl-Vinyl-Acetat (EVA) Folie. Die Schwerpunkte lagen bei den Kontaktierungsmöglichkeiten zwischen Solarzelle und Leiterbahnen. Da die rückkontaktierten Solarzellen in diesem Fall nicht rechtzeitig vorlagen, konnten deren Einsatz in diesen Glasmodulen nicht geprüft werden.

Alcan Packaging beteiligte sich weiter am EU-Projekt **HIPROLOCO** [10], in welchem neue kostengünstigere Verfahren zur Einkapselung von Solarzellen in Modulen entwickelt werden.

Das Projekt **DEMOSITE** [11a] an der ETH Lausanne wurde im Berichtsjahr in Hinsicht auf die



Figur 5: Prototypanlage für den Freilufttest mit CIS-Elementen im Projekt HIPERB (Bildquelle 3S)

mögliche Weiterverwendung minimal weiter betrieben. Es zeigt nebeneinander zahlreiche Varianten der Photovoltaik-Gebäudeintegration auf Flachdächern, Schrägdächern und Fassaden. Die Webseite www.demosite.ch erlaubt deren virtuellen Besuch und bietet zudem Weiterbildungsunterlagen für interessierte Architekten und andere Fachleute. Im Berichtsjahr konzentrierten sich die Arbeiten auf den Unterhalt der Anlagen und der Webseite sowie die Besucherbetreuung.

ELEKTRISCHE SYSTEMTECHNIK

Das **Schwergewicht in der Systemtechnik** liegt weiterhin 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 schloss im Berichtsjahr die laufende Phase des Projektes zu **Qualitätssicherung und Energieertrag von Photovoltaik Modulen** [12a] ab. Der 9. Testzyklus an insgesamt 14 Solarmodulen (3 sc-Si, 9 mc-Si, 2 a-Si) wurde abgeschlossen (Fig. 6). Der Leistungsabfall von kristallinen Solarmodulen betrug nach 9 Monaten im Mittel -3.2% , was frühere Beobachtungen bestätigt. Das gemäss ISO 17025 für Messungen zertifizierte Labor mit dem Sonnen-Simu-

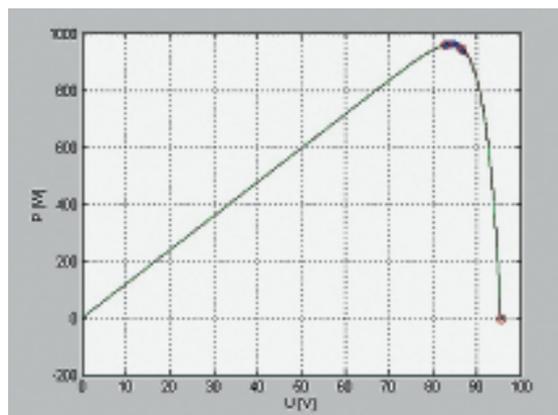


Figur 6: TISO PV Modulteststand
(Bildquelle LEEE TISO)

lator der Klasse A wurde einem jährlichen Audit unterzogen und konnte seine Präzision steigern. Im Berichtsjahr wurden rund 1500 I-V Kennlinien gemessen, davon 348 für externe Kunden. Das LEEE-TISO beteiligt sich an einem weltweiten, von 10 Labors durchgeführten *Round Robin Test* an Solarmodulen, welcher bis 2005 dauern wird. Die Messungen an den 3 Photovoltaik-Anlagen des TISO wurden fortgesetzt. Das EU-Projekt **MTBF-PV** [12b], welches das TISO zusammen mit der Europäischen Prüfstelle ESTI in Ispra an der über 20 Jahre alten netzgekoppelten 10-kWp-Anlage durchführt, wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Es zeigte sich an einer wachsenden Anzahl von Modulen (2003: 24 Module, 9.5% der Gesamtzahl) eine Delaminierung der Tedlarschicht von der rückseitigen Aluminiumfolie. Dies ist insbesondere hinsichtlich der elektrischen Sicherheit weiter zu verfolgen (kapazitive Kopplung). Ausserdem muss nach 12 Jahren der Wechselrichter ersetzt werden, wobei neu 3 Strangwechselrichter für die 3 Modulfelder zum Einsatz gelangen sollen.

Das LEEE-TISO ist zudem Partner im EU-Projekt **PV Enlargement** [12c], welches ein Demonstrationsprojekt in 10 Ländern, 5 davon in Osteuropa, mit 32 Anlagen von insgesamt 1.15 MWp Leistung darstellt. Dabei ist das LEEE-TISO für die wissenschaftliche Begleitung, insbesondere Kalibrierungsaufgaben und Performance-Messungen der verwendeten Solarmodule, zuständig. Es werden 210 zufällig ausgewählte Solarmodule getestet.

Am Photovoltaiklabor an der HTI Burgdorf wurde das Projekt über das **Langzeitverhalten von netzgekoppelten Photovoltaik Anlagen** [13a] mit Unterstützung der *Gesellschaft Mont Soleil*, der *Localnet AG* und *Elektra Baselland* sowie des BFE abgeschlossen. Es wurden 42 Anlagen mit 55 Wechselrichtern messtechnisch erfasst. Eine

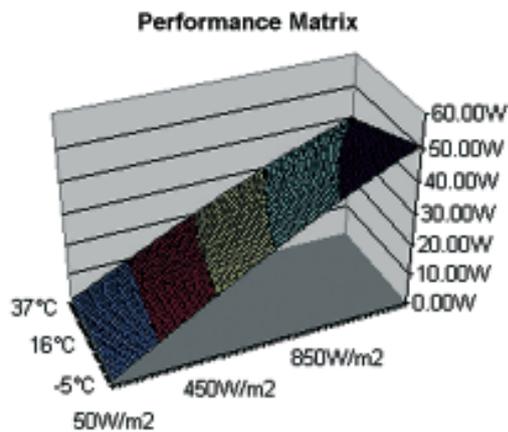


Figur 7: Automatisierte Bestimmung des Wechselrichter Maximum Power Points MPP (Bildquelle HTI Burgdorf)

hohe Wechselrichter-Zuverlässigkeit konnte auch im Berichtsjahr festgestellt werden. Der Energieertrag der 560 kWp-Anlage *Mont Soleil* betrug für 2003, 1135 kWh/kWp gegenüber 935 kWh/kWp für 2002. Die hochalpine Photovoltaik-Anlage auf dem Jungfrauoch konnte ihr 10-jähriges Bestehen feiern und verzeichnete über diesen Zeitraum einen mittleren Energieertrag von 1372 kWh/kWp. Für ausgewählte Anlagen erfolgt eine Aufbereitung der Daten in das Format der *IEA-PVPS-Task 2*-Datenbank [21]. Diese umfassenden Daten über das langjährige Betriebsverhalten unterschiedlicher Anlagen können zum Teil on-line auf www.pvtest.ch abgerufen werden. Die Arbeiten werden im Nachfolgeprojekt **Photovoltaik-Systemtechnik PVSYTE** [13b] fortgesetzt. Im Berichtsjahr wurde die Kontrollsoftware des 25 kW-Photovoltaik-Generator-Simulators überarbeitet, sodass nun halbautomatische Tests von Wechselrichtern möglich sind. Insbesondere kann die Bestimmung des Maximum Power Point MPP automatisiert durchgeführt werden (Fig. 7).

Eneco führte zusammen mit Partnern im In- und Ausland das Projekt **Energierating von Solarmodulen** [14a] durch. Als Basis dient die Performance-Matrix eines Solarmoduls (Fig. 8). Es wurden verschiedene experimentelle Methoden untereinander verglichen und ausgewertet. Dabei stellt sich die Methode des PSI mit Bestimmung der MPP-Leistung und sechs weiteren Variablen als besonders leistungsfähig heraus.

Dynatex war Partner im EU-Projekt **INVESTIRE** [15a], welches im Berichtsjahr abgeschlossen wurde. 19 weitere Unternehmen und 15 Forschungslabors beteiligten sich an der breiten Evaluation von Speichertechnologien für erneuerbare Energien und speziell Photovoltaik-Insulanlagen. Die insgesamt 9 Speichertechnologien umfassen die



Figur 8: Performance Matrix eines Solarmoduls (Bildquelle Enecolo)

wichtigsten Batterietypen (Blei, Lithium, Nickel, Metall-Luft) sowie alternative Speicherverfahren (Supercaps, Elektrolyse / Wasserstoff / Brennstoffzelle, Schwungrad, komprimierte Luft, Redox Systeme). Die charakteristischen technischen und ökonomischen Parameter dieser Speichertechnologien konnten vergleichend zusammengestellt werden, sodass ein einzigartiger Überblick entsteht. Es zeigt sich aufgrund dieses Vergleichs, dass aus wirtschaftlicher Sicht ein Verdrängen des Bleiakkumulators in den Hauptanwendungen schwierig ist. Einzig die Methode mit komprimierter Luft stellt hier eine Alternative dar.

Solaronix beteiligt sich am neuen EU-Projekt **EURO-PSB** [16] zur Entwicklung einer Polymer-Solar-Batterie. Es handelt sich dabei um eine kleine, selbstaufladende Batterie für mobile Anwendungen (Fig. 9). Das Prinzip baut auf der Kombination einer neuartigen Polymer-Solarzelle (organische Solarzelle) und einer wiederaufladbaren Polymerbatterie auf.

ERGÄNZENDE PROJEKTE UND STUDIEN

ESU-Services ist Partner im EU-Projekt **ECLIPSE** [17], welches konsistente, transparente und aktuelle Ökobilanzdaten für heutige und künftige Energiesysteme in Europa erarbeitet hat. Es soll eine Anpassung an lokale Bedingungen und technische Verbesserungen ermöglichen. Die Daten umfassen folgende neue dezentrale Technologien: Photovoltaik, Windenergie, Biomassekraftwerke, dezentrale WKK (erdgas- und biomassebefeuert), sowie Brennstoffzellen (Erdgas, Wasserstoff bzw. Biogas). Für Photovoltaiksysteme wurden Daten des Projektes **ecoinvent 2000** [41] verwendet.



Figur 9: Beispiel einer Anwendung der Polymer-Solar Batterie (Bildquelle Varta)

Das LESO an der ETH Lausanne beteiligt sich am neuen EU-Projekt **SUNtool** [11b], welches ein Modellierungswerkzeug im urbanen Kontext darstellt. Es soll typischerweise eine Gruppe von Gebäuden bis zu einem Stadtviertel ($< 1 \text{ km}^2$) energetisch und stoffflussbezogen abbilden können. Das Werkzeug baut auf umfassenden Modellen zu den einzelnen Aspekten auf und soll diese mit einem graphischen Benutzerinterface zusammenführen.

Enecolo ist am EU-Folgeprojekt **PVSAT2** beteiligt [14b]. 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 entstehen.

Das CUEPE an der Universität Genf beteiligt sich am EU-Projekt **Heliosat 3** [18] zur energiespezifischen Bestimmung der Solarstrahlung aus Meteosat-Daten. Dabei werden Daten des Satelliten *MSG (Meteosat second generation)* (www.esa.int/msg/) verwendet. Dieser neue Satellit soll präzisere Strahlungsdaten bereit stellen.

Die Universität Zürich war Partner im EU-Projekt **MSG: Multi-user solar hybrid grids** [19], welches im Berichtsjahr abgeschlossen wurde. Für die Universität Zürich standen die sozialwissenschaftlichen Aspekte einer Solarstromversorgung in netzfernen Dörfern im Vordergrund; dazu wurde ein Modell entwickelt, welches das soziale Verhalten der Benutzer dieser Anlagen abbilden soll. Es findet eine Wechselwirkung mit dem technischen Modell statt. Mit dem vollständigen Modell wurden erste Simulationen durchgeführt.

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 [42]. Die Schweiz setzte im Berichtsjahr den Vorsitz dieses weltweiten Programms fort. Aus Anlass des 10-jährigen Jubiläums dieses Programms wurde in Osaka, im Anschluss an die dritte Photovoltaik-Weltkonferenz im Mai, eine internationale Konferenz erfolgreich durchgeführt [43]. Das IEA-PVPS-Programm wird seine Bestrebungen fortsetzen und hat dazu seine Strategie überarbeitet. Ausführliche Informationen zu den Aktivitäten und Resultaten sind auf der Webseite www.iea-pvps.org zu finden.

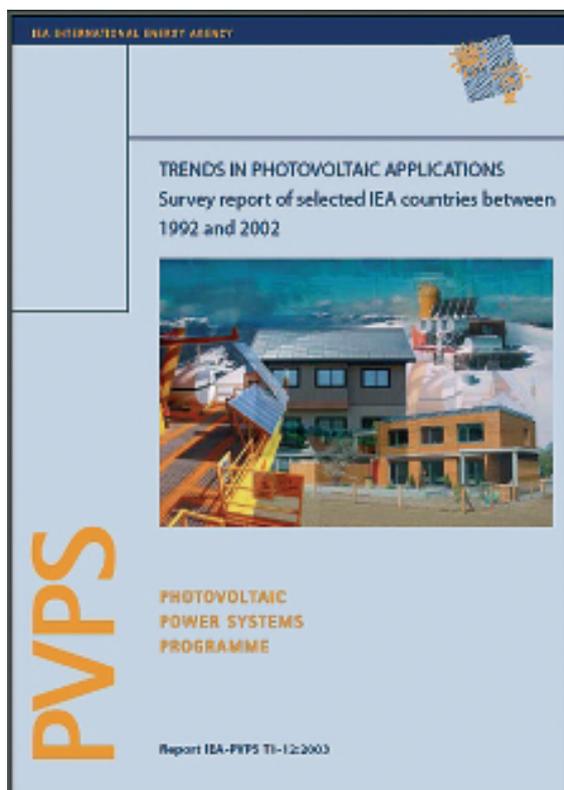
Nova Energie vertritt die Schweiz in Task 1 von IEA-PVPS, welches **allgemeine Informationsaktivitäten** [20] zur Aufgabe hat. Im Berichtsjahr wurde ein weiterer nationaler Bericht über die Photovoltaik in der Schweiz bis 2002 [44] erstellt; auf dieser Grundlage wurde die 8. Ausgabe des jährlichen internationalen Berichtes (Fig. 10) über die Marktentwicklung der Photovoltaik in den IEA-Ländern erstellt [45]. Dieser Bericht ist inzwischen eine vielzitierte Referenz über die Entwicklungen und Trends im Photovoltaik-Markt der IEA-Länder. Der **IEA-PVPS-Newsletter** [46] informiert regel-

mässig über die Arbeiten im und rund um das IEA-PVPS-Programm.

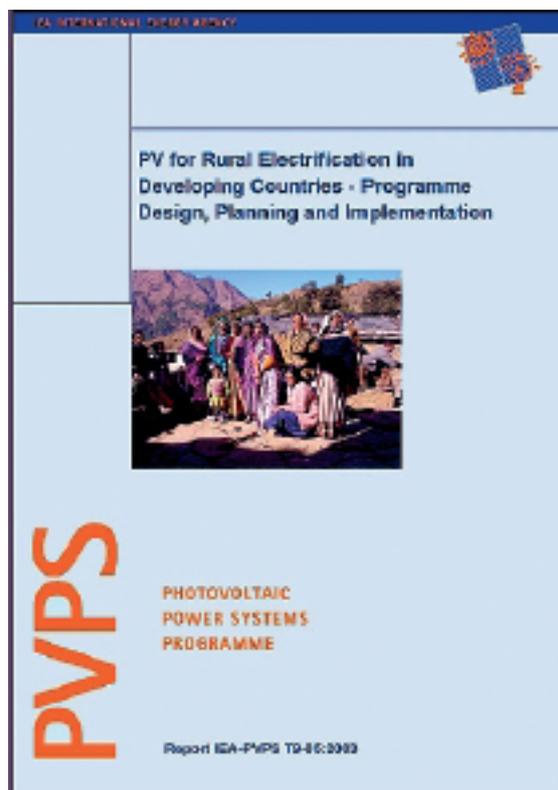
In IEA-PVPS-Task 2 über **Betriebserfahrungen** [21] stellt *TNC* den Schweizer Beitrag. Die PVPS-Datenbank **Performance Database** [47] wurde mit neuen Daten ergänzt und umfasst nun 370 Photovoltaik-Anlagen aus 13 Ländern mit insgesamt gegen 11'000 Monats-Betriebsdaten und 11.8 MWp Anlagenleistung. Die Datenbank findet reges Interesse und wurde bisher von mehr als 1600 Kunden aus 62 Ländern bestellt. Mit Hilfe der Datenbank werden einige spezifische Gebiete vertieft analysiert (Strahlungsdaten, Performance, Beschattungseffekte, Temperatureffekte und Zuverlässigkeit der Anlagen). Die Resultate dieser Analysen werden nun als Berichte vorbereitet.

Dynatex beteiligt sich an den Arbeiten in IEA-PVPS-Task 3 über **Inselanlagen** [15b]. Schwerpunkte der Aktivitäten dieses Projektes bilden die Qualitätsverbesserung und die Zuverlässigkeit von autonomen Photovoltaik-Anlagen sowie technische Fragen in hybriden Systemen und Batterien. Im Jahr 2003 wurden die Berichte zur **Erfolgskontrolle (Monitoring), Blitzschutz, Qualitätsmanagement** und **Demand Side Management von Inselanlagen** publiziert [49-52].

Zum bereits im Vorjahr abgeschlossenen IEA-PVPS-Task 5 zu technischen Fragestellungen der



Figur 10: IEA-PVPS International Survey Report



Figur 11: IEA-PVPS-Task 9 Bericht

Netzankoppelung wurde ein letzter Bericht zu **Wechselrichtertypologien und Schutzrichtungen** [53] publiziert. Die **gesammelten Berichte** mit den Resultaten zu diesem Projekt können als CD-ROM [54] bezogen werden.

Im Rahmen des Projektes **Drehscheibe Photovoltaik Entwicklungszusammenarbeit PV-EZA** leistet Entec mit Unterstützung des Staatssekretariats für Wirtschaft (seco) den Schweizer Beitrag zu IEA-PVPS-Task 9 über die **Photovoltaik-Entwicklungszusammenarbeit** [22a]. Die Schweiz ist in diesem Projekt für die Koordination der Arbeiten mit multilateralen und bilateralen Organisationen verantwortlich. Im Berichtsjahr wurden von diesem Projekt verschiedene neue Berichte (Fig. 11) zu nicht-technischen Aspekten von Projekten und Programmen publiziert [55-61].

Die Arbeit in IEA-PVPS-Task 9 wird durch verschiedene andere Tätigkeiten der Drehscheibe PV-EZA ergänzt mit dem Ziel, vermehrt Schweizer Know-how und Produkte in internationale Projekte einzubringen. Ebenso sollen die Instrumente der multilateralen Organisationen, insbesondere der **GEF (Global Environmental Facility)**, vermehrt genutzt werden. Ein entsprechendes Pilotprojekt findet unter massgebender Mitwirkung von *Enecolo* in Malaysia mit Unterstützung des BUWAL statt [14c]. Das Projekt der Drehscheibe PV-EZA wurde 2003 abgeschlossen; es soll durch eine breiter angelegte Plattform zur Förderung der erneuerbaren Energien in der internationalen Zusammenarbeit fortgesetzt werden.

Alpha Real vertritt die Schweiz im **TC 82 der IEC** und leitet die Arbeitsgruppe, welche **internationale Normenvorschläge** [23a] für Photovoltaiksysteme vorbereitet und verabschiedet. *Alpha Real* beteiligt sich ausserdem an **PV-GAP (PV Global Approval Program)**, einem weltweiten Programm zur Qualitätssicherung und Zertifizierung von Photovoltaik-Systemen. Teilaspekte dieser Bestrebungen sowie die Ausbildung sind auch Bestandteil des EU-Altener-Projekts **Quality in the Photovoltaic Sector** [23b], welches im Herbst 2003 erfolgreich abgeschlossen wurde.

Das **EU-Projekt PV-EC-NET** [22b] ist ein Netzwerk von nationalen Photovoltaik Programmkoordinationsstellen, an welchem sich 14 Länder beteiligen (www.pv-ec.net). Im Rahmen dieses Projektes wurden im Berichtsjahr verschiedene internationale Workshops organisiert. Die verschiedenen Photovoltaik Programmansätze in Europa wurden untereinander verglichen, analysiert und entsprechende Berichte erarbeitet. Im letzten Schritt wird eine *Roadmap* wichtige künftige programmatische Aspekte, sowohl national wie auf EU-Ebene, aufzeigen. Das Projekt ist als Initiative in Hinsicht auf den europäischen Forschungsraum zu verstehen. Ein ergänzendes neues EU-Projekt **PV-NAS-NET** [22c] befasst sich mit der Analyse der Situation der Photovoltaik in den Ländern Osteuropas und führt ähnliche Arbeiten wie das Projekt **PV-EC-NET** durch (www.pv-nas.net). Durch diese Projekte entsteht eine ausgezeichnete Übersicht über die verschiedenen Ansätze und Aktivitäten, aber auch über Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr wurde die vielfältige **nationale Zusammenarbeit** anlässlich verschiedener Projekte 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, der KTI, dem Programm **TOP NANO 21**, dem BUWAL, der DEZA und dem seco sowie dem VSE, dem PSEL und der *Gesellschaft Mont Soleil*. Diese vielfältigen Kontakte er-

lauben die anhaltend wichtige breite Abstützung des Programms.

Die traditionsreiche **internationale Zusammenarbeit** wurde auch im Berichtsjahr fortgesetzt: Die institutionelle Zusammenarbeit innerhalb der IEA, der IEC und PVGAP wurde bereits oben beschrieben. Auf der Projektebene konnte die erfolgreiche Zusammenarbeit innerhalb der EU in bestehenden und neuen Projekten fortgesetzt werden: Im Jahr 2003 waren es 21 Projekte im Rahmen von *DG Research* und 3 Projekte im Rahmen der *DG Transport & Energy* der EU. Weitere Projekte finden in den Programmen *IST* und *Altener* der EU statt. Die Schweizer Photovoltaik konnte sich relativ erfolgreich an den ersten Ausschreibungen im 6. Rahmenforschungsprogramm der EU be-

teiligen. Es findet ein regelmässiger Kontakt mit Programmverantwortlichen in EU-Ländern statt, ebenso mit den zuständigen Einheiten bei der Europäischen Kommission.

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 (Auswahl)

Insgesamt stieg im Jahr 2003 im Photovoltaik-P+D-Bereich die Anzahl der aktiven Projekte leicht auf gut 45 Projekte an. Dazu befanden sich anfangs 2004 wie gewohnt einige Projekte in Abklärung. Allerdings ist die Realisierung dieser Projekte aufgrund der aktuellen Budgetsituation in Frage gestellt. Die P+D-Aktivitäten verteilten sich auf die Sektoren Pilotanlagen, Studien und Hilfsmittel, Messkampagnen und Komponentenentwicklung. Die pilotmässige Erprobung neuer Komponenten bei P+D-Anlagen im Massstab 1:1 blieb weiterhin von grossem Interesse und bildete auch dieses Jahr einen klaren Schwerpunkt. Thematisch hauptsächlich vertreten bleibt weiterhin die **Photovoltaik-Gebäudeintegration**.

Aktuell befassen sich diverse Projekte mit den Einsatz- und Anwendungsmöglichkeiten verschiedener Dünnschichtzellentechnologien. Neben detaillierten Messkampagnen zum grundsätzlichen Betriebsverhalten neuer Module dieses Typs, wird bei mehreren Projekten die Eignung für die Photovoltaik-Gebäudeintegration untersucht. Die bisherigen Erfahrungen belegen die positiven Eigenschaften einiger Dünnschichtzellen-Produkte für die direkte Integration in thermisch isolierte Dächer und Fassaden ohne Hinterlüftung der Module. Dadurch öffnen sich weitere Entwicklungsmöglichkeiten mit Kostenreduktionspotential für Gebäudeintegrationen dieser Art.

NEUE P+D-PROJEKTE

Während des Berichtsjahres wurden im P+D-Programm 13 neue Projekte begonnen. In Übereinstimmung mit dem nationalen Photovoltaik Konzept 2000 - 2003 befasst sich der grösste Teil dieser Projekte mit der Thematik Photovoltaik-Anlagen im bebauten Raum, wobei dieses Jahr der Anteil der PV-Flachdachanlagen im Vergleich zu andern Anlagentypen zugenommen hat. Eine in der Schweiz zum ersten Mal realisierte Flachdachvariante mit einer neu entwickelten Kombination von flexiblen Kunststoffmembranen mit amorphen Dünnschichtzellenmodulen wurde im Dezember 2003 in Trevano in Betrieb genommen

[24] (Fig. 12). Im Bereich der autonomen PV-Anlagen traten zwei neue hybride Anlagenkonzepte (PV in Kombination mit Brennstoffzellen [25a] und PV in Kombination einem Blockheizkraftwerk (BHKW) [25b]) in die Pilotphase. Um der schnellen Entwicklung im PV-Bereich gerecht zu werden, war es dringend nötig, die veralteten Schweizer Vorschriften für photovoltaische Energieerzeugungsanlagen zu aktualisieren, bzw. die aktuellen IEC-Vorschriften in die **nationalen Installationsnormen NIN** [26] zu integrieren.

Im Jahr 2003 neu angefangene Projekte (in chronologischer Reihenfolge) behandeln:

Komponentenentwicklung

- ◆ Neues PV-Fassadensystem für Module mit Dünnschichtzellen (Entwicklung eines universellen Fassadensystems wahlweise mit oder ohne thermischer Isolation für Dünnschichtzellenmodule; Leitung: *Zagsolar / Wyss Alu-hit*) [27a]

Anlagen

- ◆ 15.4-kWp-Flachdachintegration *CPT Solar* (Pilotmässiger Einsatz einer neu entwickelten Kombination von amorphen Dünnschichtzellenmodulen mit einer dichten Kunststoffolie; Leitung: *TISO*) [24] (Fig. 12)
- ◆ 23.5-kWp-PV-Anlage Zollhof Kreuzlingen (Flachdach Demonstrationsanlage mit Demostand und Grossanzeige an gut frequentierter Lage; Leitung: *Böhni Energie und Umwelt GmbH*) [28]
- ◆ 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: *Muntwyler Energietechnik AG*) [25b]
- ◆ 16.3-kWp-Flachdachanlage mit Dünnschichtzellenmodulen ETHZ (Optisch diskrete Flachdachanlage mit amorphen Zellen; Leitung: *Zagsolar*) [27b]

- ◆ 62-kWp-Flachdachanlage mit *Power Guard*-Solardachplatten (Multifunktionale PV-Flachdachanlage mit gleichzeitiger thermischer Isolation des Dachs, wobei die thermischen Dämmelemente auch die Funktion der Modulhalterkonstruktion übernehmen; Leitung: *Zagsolar*) [27c]
- ◆ 12-kWp-*Solight*-Pilotanlage (Pilotmässige Umsetzung von zwei verschiedenen *Solight*-Varianten auf dem Flachdach der VBZ/S-Bahn-Station Stettbach; Leitung: *Energiebüro*) [29a]
- ◆ 15-kWp-Photovoltaik-Dachintegration Pfadiheim Weiermatt Köniz (Vollflächige Photovoltaik-Integration mit dem *MegaSlate®*-Solardachsystem ins Dach des energietechnisch optimierten Pfadiheims Weiermatt; Leitung: *3S - Swiss Sustainable Systems AG*) [30] (Fig. 13)
- ◆ Kleine, autonome Stromversorgungen mit Photovoltaik und Brennstoffzellen (PV-Inselkleinsysteme mit Brennstoffzellen als Backup-Stromlieferant zur autonomen Versorgung von netzfernen Messsystemen im Pilotbetrieb; Leitung: *Muntwyler Energietechnik AG*) [25a]



Figur 12: Montage der Anlage *CPT-Solar Trevano* (Bildquelle: *TISO*)

Messkampagnen

- ◆ Messkampagne Soyhières (Detaillierte Messungen und Auswertungen zur autonomen 3-kWp-PV-Dachintegration in Soyhières; Leitung: *SGI / Solstis*) [31]
- ◆ Messkampagne Wittigkofen (Detaillierte Messungen und Auswertungen mit Visualisierung der Daten zur 80-kWp-Fassade Wittigkofen; Leitung: *Ingenieurbüro Hostettler*) [32]

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*) [26]
- ◆ 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*) [33]

LAUFENDE P+D PROJEKTE

Bei den laufenden Projekten sind die ersten Messresultate des Projekts **PV-DünnFilmTest** [29b] insbesondere für die Photovoltaik-Gebäudeintegration von Dünnschichtzellenmodulen von Interesse. Auf dem Flachdach der Migros Altstetten in Zürich werden 6 verschiedene aktuell auf dem Markt erhältliche Dünnschichtsolarmodultypen in 3 unterschiedlichen Montagevarianten unterei-



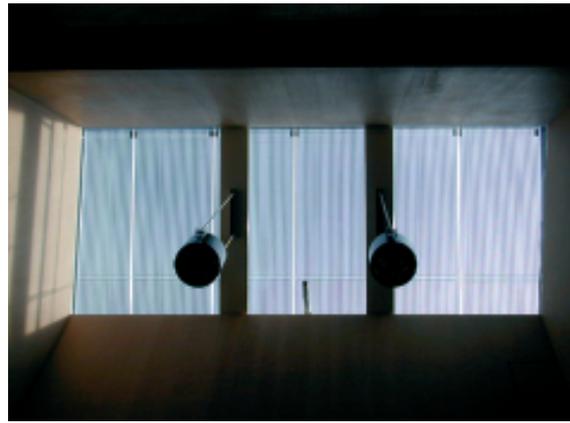
Figur 13: Dachintegration Pfadiheim Weiermatt Köniz (Bildquelle: *NET AG*)

einander und gegenüber einer Referenzanlage mit kristallinen Zellen verglichen. Für abschliessende Aussagen ist es im Moment noch zu früh. Allerdings scheint mindestens ein Teil der Module für direkte PV-Gebäudeintegrationen ohne Hinterlüftung oder mit thermischer Isolation gut geeignet zu sein (Fig. 14).

Die 3.9 kWp-**PV-Beschattungsanlage mit CIS-Zellen** [34] integriert ins Firmengebäude der



Figur 14: PV-DünnFilmTest (Bildquelle: NET AG)



Figur 15: PV-Beschattungsanlage Würth Chur, Sicht vom Gebäudeinnern (Bildquelle: NET AG)

Würth GmbH in Chur ist optisch eine interessante Erscheinung. Die seit Anfang 2003 laufenden Messungen haben nun auch die erwarteten Energieerträge von über 1100 kWh/kWp bestätigt (Fig. 15).

Die 70-kWp-**Flachdach-Anlage Palexpo** [35] fällt durch eine diskrete Integration und durch ein farblich gleichmässiges Erscheinungsbild der multikristallinen Zellen auf. Wie bei neueren Anlagen üblich werden bisher auch hier gute Erträge um die 1000 kWh/kWp erzielt (Fig. 16).

Die 5.5-kWp-**Dachintegration mit amorphen Dünnschichtzellen Freestyle®** in Lutry bei Lausanne [36] passt gut ins moderne architektoni-

sche Konzept des Gebäudes. Die Anlage ist insgesamt auf 4 verschiedene Dachflächen verteilt und speist den Strom über einen Wechselrichter vom Typ *Sunny Boy Multistring* ins Netz. Für ein einheitliches Erscheinungsbild der Dächer wurden die Dachabschlüsse farblich an die Module angepasst (s. Titelbild Programmbericht).

Die zwei **fassadenintegrierten Anlagen** [37] der Seilbahn Berg- und Talstation des letzten Teilstücks auf dem Weg zum Piz Nair mit Leistungen von 13.5 kWp bzw. 9.7 kWp setzen den beiden Gebäuden mit dem glitzernden Lichtspiel der multikristallinen Zellen einen besonderen Akzent (Fig. 17).



Figur 16: 70-kWp-Flachdachanlage Palexpo Genf (Bildquelle: NET AG)



Figur 17: 9.7 kWp-Fassade der Piz Nair Seilbahn Talstation (Bildquelle: NET AG)

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Der weltweite Photovoltaikmarkt boomt aufgrund grossangelegter Förderprogramme bzw. Einspeisevergütungen einzelner Länder weiterhin mit Wachstumsraten zwischen 30 und 40%. Dem-

gegenüber war der schweizerische Photovoltaikmarkt auch im Jahr 2003 nicht verwöhnt aber er konnte sich dank den Solarstrombörsen immerhin auf den Vorjahreswerten halten. Es sind mittler-

weile in der Schweiz regional sehr unterschiedliche Verhältnisse entstanden, ein Umstand der inhaltlich zu bedauern ist, der aber in der Eigenständigkeit der Kantone und Gemeinden gründet. Die länderspezifischen Photovoltaik-Marktdaten des IEA-PVPS-Programms zeigen, dass die Schweiz relativ und gegenüber den Entwicklungen in den gegenwärtig grössten Märkten, insbesondere Deutschland und Japan, zurückfällt, sich aber andererseits gegenüber vielen anderen Ländern durchaus sehen lassen kann. Die Schweizer Photovoltaik war an der 3. Photovoltaik Weltkonferenz im Mai in Osaka mit ihren Beiträgen gut vertreten und konnte auch zwei Auszeichnungen mit nach Hause nehmen [62].

Die Diskussionen rund um das Fortbestehen von EnergieSchweiz blieb im Berichtsjahr ein zentrales Thema, welches für grosse Verunsicherung bei allen Beteiligten sorgte. Von den inzwischen beschlossenen Kürzungen sind vorab die Mittel für P+D-Vorhaben betroffen. Sie haben damit auch einschneidende Wirkung auf die Ausgestaltung und die Möglichkeiten im Programm Photovoltaik. 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. Es wäre ein Widerspruch, die sich nach langem Aufbau abzeichnende verstärkte Umsetzung im Programm Photovoltaik zu gefährden.

P+D-Projekte sind ein unabdingbares Bindeglied zwischen Forschung / Entwicklung und der Umsetzung der Resultate in industrielle Prozesse, Produkte und Anlagen. Sie sind nahe an der Anwendung und beim Markt. Ein wichtiges Ziel dieser Projekte ist es, die vorgeschlagenen Lösungen nachhaltig umzusetzen. Dies bedeutet, dass nicht nur Anlagen mit Pilotcharakter erstellt werden, sondern dass insbesondere die notwendigen Bedingungen für eine industrielle Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse spezielles Gewicht er-

halten. Ziel ist demnach, neue Verfahren und Produkte zu fördern, welche anschliessend durch die Industrie und den Markt aufgenommen werden.

Durch die breite Abstützung des Programms *Photovoltaik* konnte die Anzahl der Projekte und die eingesetzten Mittel der öffentlichen Hand trotz der angespannten Finanzlage bisher gehalten werden. Dazu haben EU-Projekte mit Unterstützung des Bundesamtes für Bildung und Wissenschaft BBW ebenso beigetragen, wie die Kommission für Technologie und Innovation KTI. Die gute Vernetzung des Programms und seiner Akteure, sowohl national wie international, ist dabei eine wichtige Voraussetzung, welcher weiterhin grosse Beachtung geschenkt wird. Es ist von zentraler Bedeutung, dass für die vom BFE unterstützten P+D-Vorhaben auch in Zukunft eine Substitution der ansonsten nicht vorhandenen Mittel gefunden werden kann.

In Abstimmung mit dem Energieforschungskonzept der CORE 2004 – 2007 wurde ein entsprechendes Detailprogramm Photovoltaik 2004 – 2007 vorbereitet. Die bisherige Ausrichtung des Programms wird weitgehend beibehalten, wobei die Solarzellen und –module gegenüber den anderen Bereichen sowie die industrielle Umsetzung noch stärkeres Gewicht erhalten.

Der Informationsaustausch ist und bleibt ein wichtiges Thema. Die Photovoltaik-Webseite www.photovoltaic.ch ist seit Herbst 2003 in deutsch vollständig operationell, eine englische und eine französische Version ist in Vorbereitung. Als wichtigste nationale Veranstaltung findet im Jahr 2004 die 5. Nationale Photovoltaik Tagung an der ETHZ statt (25./26. März 2004). Der Gebäudeintegration der Photovoltaik ist der ganze zweite Tag gewidmet. Ausserdem finden die 19. Europäische Photovoltaik Konferenz in Paris (7.-11. Juni 2004) und das 19. Symposium für Photovoltaische Solarenergie in Staffelstein (10.-12. März 2004) statt.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2003 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

Einzelne Jahresberichte können von www.photovoltaiic.ch heruntergeladen werden

Schlussberichte können bei ENET bezogen und von www.photovoltaiic.ch heruntergeladen werden

Unter den aufgeführten Internet-Adressen können weitere Informationen heruntergeladen werden

- [1] A. Shah, (arvind.shah@unine.ch), IMT, UNI-Neuchâtel, Neuchâtel: **a) Thin film silicon solar modules: Contributions to low cost industrial production** (JB) ♦ **b) DOIT - Development of an Optimized Integrated Thin-film silicon solar module** (JB) / <http://www-micromorph.unine.ch>
- [2] Ch. Hollenstein, (christophe.hollenstein@epfl.ch), CRPP / EPFL, Lausanne: **Large area and high-throughput coating system (PECVD) for silicon thin-film solar cells** (JB) / http://crp-pwww.epfl.ch/crpp_proc.htm
- [3] D. Fischer, (diego.fischer@flexcell.ch), VHF-TECHNOLOGIES, Le Locle: **a) Aufräuen von Polymersubstraten Gezieltes Aufräuen von Plastikfolien für ein effizientes Light Trapping in amorphen Solarzellen** (JB, SB, ENET 230106) ♦ **b) Generation of random nano-patterns in polymer surfaces due to replication of nano-crystal grain boundaries** (JB) ♦ **c) Étude et amélioration de la fiabilité des cellules solaires sur substrats polymers** (JB) ♦ **d) Photoactive Composite Module** (JB) / <http://www.flexcell.ch>
- [4] A. Müller, (amueller@hct.ch), HCT SHAPING SYSTEMS, Cheseaux-sur-Lausanne: **RE-Si-CLE: Recycling of Silicon Rejects from PV Production Cycle** / <http://www.hct.ch/>
- [5] A.N. Tiwari, (tiwari@phys.ethz.ch), IQE, ETH, Zürich: **a) PROCIS: Production of large area CIS modules** (JB) ♦ **b) NEBULES: New buffer layers for efficient chalcopyrite solar cells** (JB) ♦ **c) METAFLEX: Towards the roll-to-roll manufacturing of cost effective CIS modules-intermediate Stepps** (JB) ♦ **d) Nanomaterials for high efficiency and low cost Cu(In,Ga)Se2 thin film solar cells** (JB) / <http://www.tfp.ethz.ch/>
- [6] M. Grätzel, (michael.graetzel@epfl.ch), ICP2 / EPFL, Lausanne: **a) Dye sensitised Nanocrystalline Solar Cells** (JB) ♦ **b) Highly Efficient Nanocrystalline Solar Cells for Indoor Applications - TOP NANO 21** (JB) ♦ **c) Flexible dye solar cells** (JB) ♦ **d) NANOMAX - dye-sensitised nanocrystalline solar cells having maximum performance** (JB) / <http://dcwww.epfl.ch/icp/ICP-2/icp-2.html>
- [7] 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/>
- [8] P. Hofer, (ho@3-s.ch), 3S, Bern: **a) Photovoltaic Modules with Antireflective Glass** (JB) ♦ **b) HIPERB High Performance photovoltaics in buildings** (JB) ♦ **c) AFRODITE Advanced Façade and Roof Elements Key to Large Scale Building Integration of Photovoltaic Energy** (JB) / <http://www.3-s.ch/>
- [9] M. Kurth, (info@Kurth-Glas.ch), KURTH GLAS & SPIEGEL, Zuchwil: **ADVANTAGE Advances next generation rear contact module technology for building** (JB) / www.kurth-glas.ch
- [10] W. Lohwasser, (Wolfgang.Lohwasser@alcan.com), ALCAN PACKAGING SERVICES, Neuhausen: **HIPROLOCO Hight productivity and low cost for the encapsulations of thin film solar** / http://www.alcanpackaging.com/about/eng/about_rd.php
- [11] Ch. Roecker, (christian.roecker@epfl.ch), LESO / EPFL, Lausanne: **a) Exploitation Demosite 2003-2004** (JB) / <http://www.demosite.ch> ♦ **b) N. Morel, (nicolas.morel@epfl.ch), LESO-PB/EPFL, Lausanne: SUNtool A Sustainable Urban Neighborhood Modelling Tool** (JB) / <http://lesomail.epfl.ch>

- [12] D. Chianese, (domenico.chianese@supsi.ch), LEEE, SUPSI - DCT, Canobbio: **a) Qualità e resa energetica di moduli ed impianti PV TISO - periodo VI: 2000-2003** (JB, SB, ENET 240013) ♦ **b) Mean Time Before Failure of Photovoltaic modules (MTBF-PVm)** (JB) ♦ **c) PV Enlargement** (JB) / <http://www.lee.e.supsi.ch>
- [13] H. Häberlin, (heinrich.haerberlin@hti.bfh.ch), HTI, Burgdorf: **a) Langzeitverhalten von netzgekoppelten Photovoltaikanlagen 2 (LZPV2)** (JB, SB, ENET 230256-230259) ♦ **b) Photovoltaik-Systemtechnik 2003-2004 (PVSYTE)** (JB) / <http://www.pvtest.ch>
- [14] P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), ENECOLO, Mönchaltorf: **a) Energy Rating of Solar Modules** (JB) ♦ **b) PVSAT2 - Intelligent Performance Check of PV System Operation Based on Satellite Data** (JB) ♦ **c) MBIPV Malaysia Building Integrated Photovoltaic** / <http://www.solarstrom.ch>
- [15] M. Villoz, (mvilloz@dynatex.ch), DYNATEX, Morges: **a) INVESTIRE - Investigation on Storage Technologies for Intermittent Renewable Energies** (JB) ♦ **b) IEA PVPS Task 3 Use of photovoltaic systems in stand-alone and island applications** (JB) / www.dynatex.ch
- [16] A. Meyer, (andreas@solaronix.com), SOLARONIX, Aubonne: **The European Polymer Solar Battery EURO-PSB** (JB) / <http://www.solaronix.com>
- [17] R. Frischknecht, (frischknecht@esu-services.ch), ESU-SERVICES, Uster: **ECLIPSE: Environmental and ecological life cycle inventories for present and future power systems in Europe** (JB) / <http://www.esu-services.ch>
- [18] P. Ineichen, (pierre.ineichen@cuepe.unige.ch), CUEPE, Genève: **Energy specific Solar Radiation Data from Meteosat Second Generation: The Heliosat-3 project** (JB) / www.unige.ch/cuepe
- [19] H.-J. Mosler, (mosler@eawag.ch), UNIVERSITÄT, Zürich: **MSG: Combined project on multi-user solar hybrid grids** (JB)
- [20] P. Hüsler, (pius.huessler@novaenergie.ch), NOVA ENERGIE, Aarau: **Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Programm, Task 1** (JB) / <http://www.novaenergie.ch/>
- [21] Th. Nordmann, (nordmann@tnc.ch), TNC CONSULTING, Erlenbach: **IEA PVPS Programm, Task 2 (Schweizer Beitrag 2003)** (JB) / <http://www.tnc.ch>
- [22] S. Nowak, (stefan.nowak@netenergy.ch), NET, St. Ursen: **a) Swiss Platform PV Development Cooperation and 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** (JB) ♦ **c) PV-NAS-NET Co-ordination of Newly Associated States and EU RTD Programmes on Photovoltaic Solar Energy** (JB) / <http://www.photovoltaic.ch>
- [23] M. Real, (alphareal@access.ch), ALPHA REAL, Zürich: **a) IEC Normenarbeit für PV Systeme** (JB) ♦ **b) Quality in the Photovoltaic Sector** (JB, SB, ENET 240014)

Liste der P+D – Projekte (Auswahl)

- [24] D. Chianese, (domenico.chianese@supsi.ch), TISO, Canobbio: **Intégration en toiture plate CPT Solar**, (JB) / <http://www.lee.e.supsi.ch>
- [25] U. Muntwyler, (muntwyler@solarcenter.ch), MUNTWYLER ENERGIETECHNIK, Zollikofen: **a) Autonome Stromversorgung mit Photovoltaik und Brennstoffzellen** (JB) ♦ **b) Autonome Stromversorgung mit Photovoltaik und BHKW** / <http://www.solarcenter.ch/>
- [26] J. Keller, (Jost.keller@electrosuisse.ch) ELECTROSUISSE, Fehraltorf: **Integration der neuen IEC Norm 60364-7-712 für Photovoltaik in die nationalen Installationsnormen NIN** (JB) / <http://www.electrosuisse.ch/>

- [27] R. Durot, (r.durot@zagsolar.ch), ZAGSOLAR, Kriens: **a) Photovoltaic- Facade Mounting System for Thin-Film-Modules** (JB) ♦ **b) 16.3 kWp Installation with Thin-Film-Elements on the Flat Roof at the CNB-Building of the ETHZ** (JB) ♦ **c) 62 kWp PV-Installation - Flat Roof Integration with PowerGuard Tiles** (JB) / <http://www.zagsolar.ch/>
- [28] Th. Böhni (boehni@euu.ch), BÖHNI ENERGIE UND UMWELT, Frauenfeld: **PV Demonstrationsanlage Zollhof Kreuzlingen** / <http://www.euu.ch>
- [29] Ch. Meier, (info@energieburo.ch), ENERGIEBÜRO, Zürich, **Preparation and Realisation of the Test- and Pilot Installation SOLIGHT** (JB) ♦ **b) PV-ThinFilmTest** (JB) / <http://www.energieburo.ch>
- [30] T. Szacs vay, (sz@3-s.ch), SWISS SUSTAINABLE SYSTEMS 3S, Bern: **Roof Integrated PV-System Scout House Weiermatt, Köniz** (JB) / <http://www.3-s.ch/>
- [31] P. Affolter, (Pascal.affolter@solstis.ch), SOLSTIS, Lausanne: **Installation photovoltaïque autonome (3,1 kWp)** (JB) / <http://www.solstis.ch/>
- [32] Th. Hostettler (Hostettler.Engineering@Compuserve.com), INGENIEURBÜRO HOSTETTLER, Bern: **Messkampagne Wittigkofen** (JB) /
- [33] R. Locher, (rlocher@szff.ch), SCHWEIZERISCHE ZENTRALSTELLE FÜR FENSTER - + FASSADENBAU (SZFF), Dietikon: **Gebäude-Integrierte-Solarstrom-Systeme GISS** (JB) / www.szff.ch/
- [34] D. Ruoss, (info@enecolo.ch), ENECOLO, Mönchaltorf: **Monitoring of the CIS BIPV Plant Würth in Choire** (JB) / <http://www.solarstrom.ch/>
- [35] L. Keller, (office@sses.ch), SOCIÉTÉ SUISSE POUR L'ÉNERGIE SOLAIRE SSES, Bern: **Installation photovoltaïque à Palexpo** (JB) / <http://www.sses.ch/>
- [36] P. Affolter, (Pascal.affolter@solstis.ch), SOLSTIS, Lausanne: **Toiture photovoltaïque Freestyle® de 5.5 kWp** (JB) / <http://www.solstis.ch/>
- [37] W. Maag (info@SunTechnics.ch), SUNTECHNICS FABRISOLAR, Küsnacht: **PV St. Moritz - Corvigliabahn - Piz Nair** (JB)

Referenzen

- [38] **Forschungskonzept Photovoltaik 2000 – 2003**, Bundesamt für Energie, 2001, www.photovoltaic.ch
- [39] **Presseanlass IMT – Unaxis**, Neuchâtel, März 2003
- [40] C. Droz et al., http://www-micromorph.unine.ch/Publications/PS_files/paper_365.pdf
- [41] Frischknecht, R. **Life cycle inventory modelling in the Swiss national database ecoinvent 2000**. in Sustainability in the Information Society, 15th International Symposium Informatics for Environmental Protection, ETH Zürich. 2001, Metropolis-Verlag, Marburg
- [42] **Annual Report 2003**, IEA PVPS, 2003, <http://www.iea-pvps.org/>
- [43] **IEA PVPS International Conference 2003**, Past, Present and Future, Osaka, Mai 2003, www.iea-pvps.org
- [44] **National Survey Report on PV Power Applications in Switzerland 2002**, P. Hüsser, (pius.huesser@novaenergie.ch), Nova Energie, June 2003
- [45] **Trends in Photovoltaic Applications in selected IEA countries between 1992 and 2002**, IEA PVPS Task 1 – 12: 2003, <http://www.iea-pvps.org>
- [46] **IEA PVPS Newsletter**, zu beziehen bei Nova Energie, Schachenallee 29, 5000 Aarau, Fax 062 834 03 23, (pius.huesser@novaenergie.ch)
- [47] **Performance Database**, IEA PVPS Task 2, Version 1:19, May 2003, <http://www.task2.org>

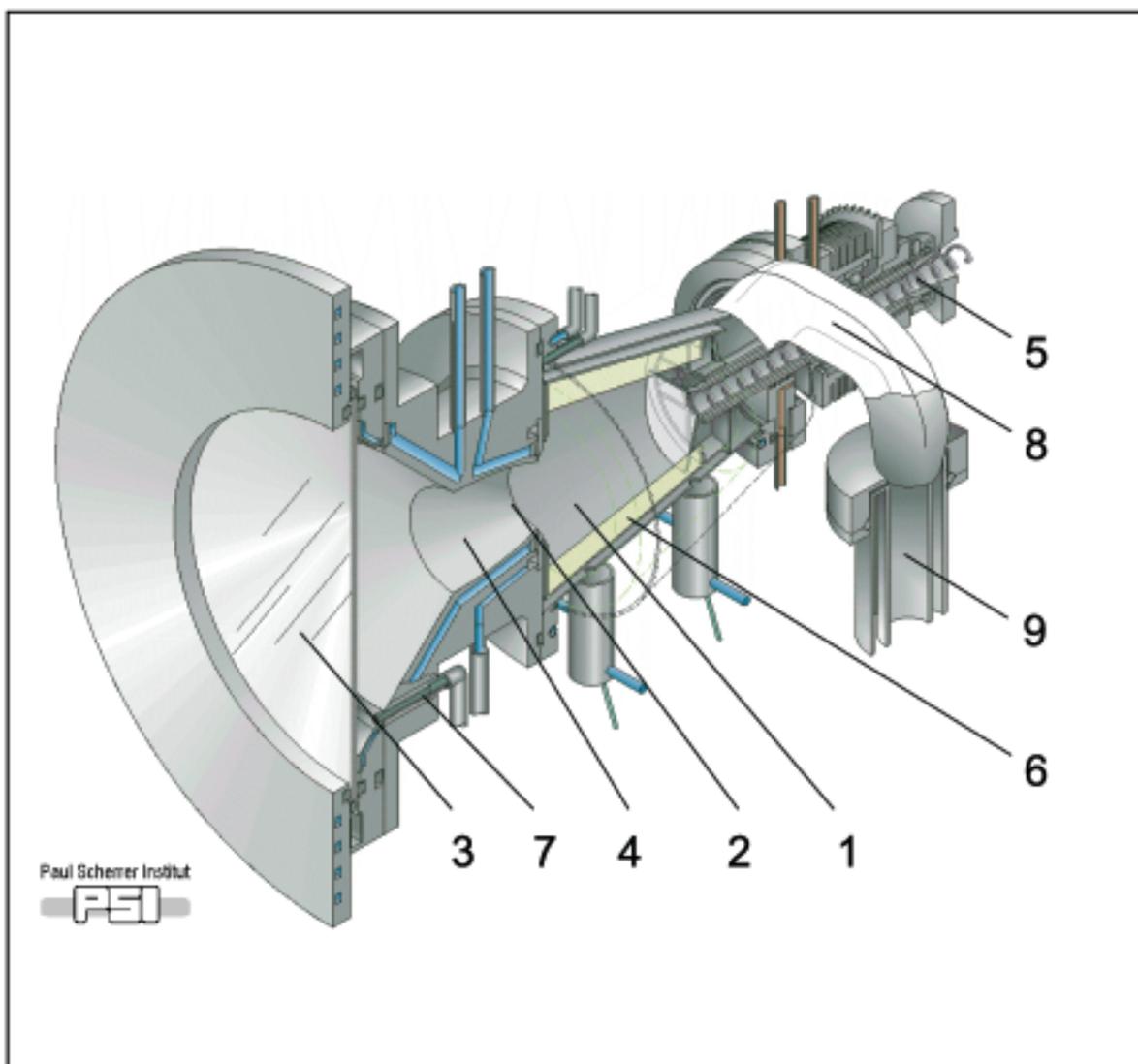
- [48] **Guidelines for selecting Stand-Alone Photovoltaic systems**, IEA PVPS T3-12:2002, September 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [49] **Guidelines for monitoring Stand-Alone Photovoltaic systems : methodology and equipment**, IEA PVPS T3-13:2003, October 2003, <http://www.iea-pvps.org>
- [50] **Common practices for protection against the effects of lightning on Stand-Alone Photovoltaic systems**, IEA PVPS T3-14:2003, October 2003, <http://www.iea-pvps.org>
- [51] **Recommended practices for managing the quality of Stand-Alone Photovoltaic systems**, IEA PVPS T3-15:2003, October 2003, <http://www.iea-pvps.org>
- [52] **Demand side management for Stand-Alone Photovoltaic systems**, IEA PVPS T3-16:2003, October 2003, <http://www.iea-pvps.org>
- [53] **Grid-connected photovoltaic power systems: survey of inverter and related protection equipments**, IEA PVPS T5-5:2002, December 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [54] **IEA PVPS Task 5 CD**, zu beziehen bei Programmleitung Photovoltaik, NET AG, Waldweg 8, CH-1717 St. Ursen, info@netenergy.ch, <http://www.photovoltaic.ch>
- [55] **Summary of Models for the Implementation of Photovoltaic Solar Home Systems in Developing Countries Part 1: Summary**, IEA PVPS T9-02:2003, Februar 2003, www.iea-pvps.org
- [56] **Summary of Models for the Implementation of Photovoltaic Solar Home Systems in Developing Countries Part 2: Practical Experience**, IEA PVPS T9-02:2003, Februar 2003, <http://www.iea-pvps.org>
- [57] **PV for Rural Electrification in Developing Countries - A Guide to Capacity Building Requirements**, IEA PVPS T9-03:2003, 2003, <http://www.iea-pvps.org>
- [58] **The Role of Quality Management, Hardware Certification and Accredited Training in PV Programmes in Developing Countries**, IEA PVPS T9-04:2003, September 2003, <http://www.iea-pvps.org>
- [59] **PV for Rural Electrification in Developing Countries– Programme Design, Planning and Implementation**, IEA PVPS T9-05:2003, September 2003, <http://www.iea-pvps.org>
- [60] **Institutional Framework and Financial Instruments for PV Deployment in Developing Countries**, IEA PVPS T9-06:2003, September 2003, <http://www.iea-pvps.org>
- [61] **16 Case Studies on the Deployment of Photovoltaic Technologies in Developing Countries**, IEA PVPS T9-07:2003, September 2003, <http://www.iea-pvps.org>
- [62] **Die 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion Osaka 12.–16. Mai 2003 aus Schweizer Sicht**, zu beziehen bei NET, Waldweg 8, 1717 St. Ursen, info@netenergy.ch, <http://www.photovoltaic.ch>

SOLARCHEMIE / WASSERSTOFF

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Armin Reller

armin.reller@physik.uni-augsburg.de



Reaktor zur solarthermischen Produktion von Zink aus Zinkoxid

Die Abbildung zeigt einen Schnitt durch den Solarreaktor, in dem durch konzentrierte Solarstrahlung Zinkoxid zu Zinkdampf und Sauerstoff zerlegt wird (1 = rotierender Hohlraum; 2 = Öffnung; 3 = Quarzfenster; 4 = CPC; 5 = Fördereinheit; 6 = äussere konische Schale; 7 = Zinkoxidschicht; 8 = Produkt-Auslass; 9 = Quench-Einheit)

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Ziel des Programms *Solarchemie / Wasserstoff* ist die Umwandlung, Speicherung und Nutzung von solarer Strahlungsenergie mittels thermischer und/oder chemischer Prozesse. Wärmeenergie, Wasserstoff oder Wertstoffe sind die erwünschten Produkte. Es werden möglichst effiziente Prozesse entwickelt, 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 Stabilisierung bzw. der Reduktion des Einsatzes von fossilen Energieträgern, was die notwendige Reduktion des CO₂-Austosses zur Folge hat. 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 auf der Entwicklung und/oder Optimierung von Verfahren und Produkten mit hoher Wertschöpfung, innovativen Funktionsmaterialien und effizienten Energietechnologien.

Das Programm *Solarchemie/Wasserstoff* gliedert sich in drei Schwerpunkte: solare Prozessenergie zur Herstellung von Wasserstoff oder Wertstoffen, Wasserstofftechnologie sowie komplementäre Technologien.

Im ersten Schwerpunkt wird die Bereitstellung von **solarer Prozessenergie** in unterschiedlichen Temperaturbereichen und dementsprechend mit unterschiedlichen Nutzungspotentialen vorangetrieben. Im Hochtemperaturbereich wird die Herstellung von Zink aus Zinkoxid sowie das Brennen von Kalk untersucht. Diese solaren Hochtemperaturprozesse sollen für die Reduktion von Kohlendioxidemissionen sowie für die immer bedeutender werdende Kreislaufwirtschaft von Materialien einen entscheidenden Beitrag leisten. Projekte dieses Schwerpunkts sind vor allem P+D-Projekte.

Im Schwerpunkt **Wasserstofftechnologie** wird angestrebt, den sekundären Energieträger Wasserstoff mittels regenerativer und technisch realisierbarer Herstellungsweisen, insbesondere mittels solarthermischer (Zink/Zinkoxidzyklus), elektrolytischer und photokatalytischer Spaltung von Wasser effizient bereit zu stellen. Es wird auch abgeklärt, inwiefern Wasserstoff aus Biomasse oder aus der Dekarbonisierung fossiler Energieträger gewonnen werden kann. Neben der Herstellung wird die sichere chemische und physikalische Speicherung von Wasserstoff, insbesondere in Metallhydriden und in Druckbehältern, untersucht. Diese Grundvoraussetzung für die Verbreitung der Wasserstofftechnologie erfordert die Bereitstellung von geeigneten Materialien, Prozessen und technischen Systemen. Synergien zwischen Erforschung, Entwicklung und technisch-industrieller Implementierung der Wasserstofftechnologie werden durch die nun operative schweizerische Wasserstoff-Vereinigung *HYDROPOLE* unterstützt. Diese BFE-Tochter soll als Koordinationsstelle und Informationsplattform für die tragfähige Wasserstofftechnologie und damit für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft agieren.

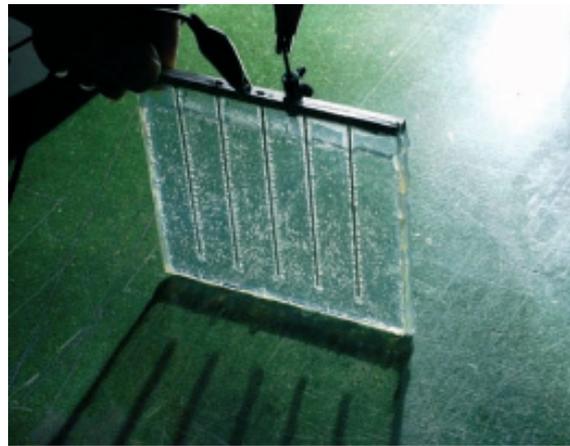
Die **Bereitstellung effizienter Verfahren und massgeschneiderter Funktionsmaterialien** für regenerative Energietechnologien wird im dritten Schwerpunkt gefördert: als effiziente Absorber im Tief- und Mitteltemperaturbereich werden schichtartig aufgebaute Materialien mit selektiven Absorptionseigenschaften entwickelt. Einsatzgebiet ist - mit hohem CO₂-Einsparpotential - die Haus- und Gebäudetechnik. Konzentrierte Solarstrahlung wurde in zwei weiteren Projekten zum Brennen des wichtigen Baustoffs Kalk aber auch zum Betrieb eines 24-Stunden-Kraftwerks, welches auf einem chemischen Speichersystem (Ammoniak / Wasserstoff) beruht, effizient umgewandelt. Schliesslich wird die Energiespeicherung mittels Drucklufttechnologie weiter bearbeitet; theoretische Studien und praktische Weiterentwicklungen belegen, dass das Potential dieser Energietechnologie bei weitem nicht ausgeschöpft ist.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Photokatalytische Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff

Die erfolgreiche Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mittels Solarstrahlung bei Umgebungstemperaturen beruht auf der Verfügbarkeit von effizienten Photokatalysatoren, selektiven Photosensibilisatoren und angepassten Elektrodenmaterialien. Im Forschungsverbund zwischen der Universität Bern, der EPFL Lausanne und der Université de Genève werden in den drei Verbund-Projekten **Photochemische und photoelektrochemische 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] entsprechende Materialkombinationen entwickelt und zu funktionstüchtigen Systemen vereinigt. An der Universität Bern konnte gezeigt werden, dass ein Antennenähnlich arbeitendes Kompositmaterial (Zeolith mit Farbstoff in den Kanälen) Photonen bzw. durch Photonen erzeugte Anregungsenergie einfangen kann und gerichtet zu einem Halbleiter führt. Mit dieser Anordnung kann eine neue Generation eines photovoltaisch arbeitenden Systems zur Stromerzeugung bzw. Elektrolyse aufgebaut werden. Daneben wurde das auf Silber/Silberchlorid und platinierterm Silizium basierende System zur Spaltung von Wasser erheblich verbessert: mit Gold Nanopartikeln sensibilisierte AgCl-Schichten konnten die produzierte O₂-Menge und der Photostrom um den Faktor 3 verbessert werden. Auch durch Zugabe von Bromionen lies sich eine erhöhte Lichtabsorption im sichtbaren Bereich erzeugen und damit die Gesamteffizienz steigern. Mit der an der Universität Genf für die Tandem-Zelle neu entwickelte halbtransparente Wolframoxid-Elektrode (Fig. 1) konnte die weltweit bis anhin höchste Solarstrahlung-zu-Wasserstoff-Aubeute (6 – 7% Effizienz) erreicht werden, wenn als Gegenelektrode das an der EPFL Lausanne optimierte Photosensibilisator-Titanoxid verwendet wurde. Der Einsatz von Eisenoxid als Photoanodenmaterial und von neuen Ruthenium-basierten Photosensibilisatoren sollte ermöglichen, dass der Wirkungsgrad des Gesamtsystems weiter erhöht werden kann. Aber auch die Fertigung von 10 x 10 cm grossen Tandem-Zellen konnte demonstriert werden (siehe Figur 1). Dieser Schritt ist für die Kommerzialisierung des nun funktionstüchtigen Systems sehr wichtig.



Figur 1: 10cm x 10cm Wolframtrioxid Photoanode für die Herstellung von Sauerstoff durch die Spaltung von Wasser mit der energieintensiven, blauen Strahlung des Solarspektrums. Die Anode wird mit einer Platinkathode zur Wasserstofferzeugung kombiniert. Gemeinsame Entwicklung der Universität Genf, Solaronix AG und Hydrogen Solar (UK).

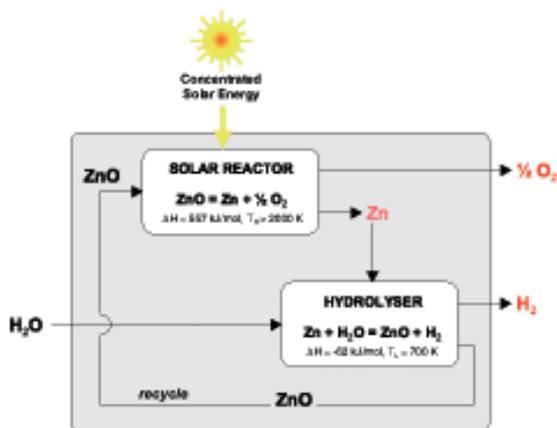
Solarthermische Herstellung von Wasserstoff oder Synthesegas aus fossilen Rohstoffen

Die Reduktion des CO₂-Ausstosses, d.h. die verstärkte Nutzung wasserstoffreicher Energieträger oder von reinem Wasserstoff ist eines der wichtigsten Ziele der gegenwärtigen Energieforschung. Eine kohlenstofffreie Energiewirtschaft ist erstrebenswert, kann aber aufgrund wirtschaftlicher und technischer Kriterien nur längerfristig realisiert werden. Prozesse, die den Wasserstoffanteil im Energieträger stark erhöhen und gleichzeitig den Kohlendioxidausstoss verringern, erfüllen die Forderung an Übergangslösungen vom fossilen zum regenerativen Energiesystem in optimaler Weise. Die solare Kohlevergasung mit Wasserdampf stellt einen Prozess mit grossem Kohlendioxid-Einsparpotential dar. Im Projekt **Solar Decarbonization of Fossil Fuels – Clean Energy Technologies for CO₂ Mitigation** [4] wurde mit Modellrechnungen gezeigt, dass die solarthermische Produktion von Synthesegas durch die Vergasung von Kohle mit Wasserdampf eingesetzt werden kann. Die Kinetik und die Mechanismen, sowie die verfahrenstechnischen Parameter der Prozesse konnten mit einem numerischen Modell bestimmt und optimiert werden.

Solarthermische Spaltung von Wasser

Die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mittels mehrstufiger, reversibler Me-

tall/Metalloxid-Redoxzyklen, gehört zu der über viele Jahre aufgebauten Kernkompetenz des Programms. In dem nun abgeschlossenen Projekt **The Solar Production of Zinc** [5] konnten die chemischen und thermodynamischen Bedingungen für die effiziente solarthermische Produktion von Zinkmetall aus Zinkoxid bestimmt werden (s. Titelbild Programmbericht). Die optimalen verfahrenstechnischen Parameter, d.h. die Abtrennung des Zinkdampfs von den restlichen Gasen am Ausgang der Solarreaktoren, wurden im begleitenden Projekt **Solarchemische Beiträge zur Reduktion des CO₂-Ausstosses** [6] erarbeitet. Neben den technischen Entwicklungen, die einen möglichst effizienten Prozess ermöglichen sollen, wurden die der Zersetzung von Zinkoxid zugrunde liegenden Mechanismen im Projekt **Darstellung und Spektroskopie von ZnO bzw. Zn_xO_y in der Gasphase** [7] mittels massenspektrometrischer und ausgewählter spektroskopischer Methoden im Detail charakterisiert (Fig. 2). Aussagen über die Art und Grösse der sich bildenden gasförmigen Zinkteilchen sind für die Optimierung der Zinkgewinnung wichtig. 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.



Figur 2: Schematische Darstellung der solarthermischen Reduktion von Zinkoxid zu Zink als solarem Brennstoff für die Wasserstoffproduktion.

Aufgrund der Tatsache, dass dieser Zinkoxidzyklus auch aus internationaler Sicht als vielversprechender solarthermischer Prozess zur Wasserstoffgewinnung gilt und in der Schweiz nicht nur die entscheidenden Forschungsarbeiten geleistet wurden, sondern zur Zeit auch hochqualifizierte

Kompetenzen verfügbar sind, muss den genannten Projektarbeiten ein entsprechender Stellenwert beigemessen werden. Die mit den Metall / Metalloxidzyklen, insbesondere dem Zink / Zinkoxidzyklus erarbeiteten Erfahrungen wurden auch als Basis für neue solarthermische Prozesse eingesetzt. So wurden z.B. erste Schritte zur direkten solarthermischen Spaltung von Metallsulfiden (häufige Erze) in die entsprechenden Metalle und Schwefel unternommen. Derartige Prozesse können in Zukunft konventionelle, mit hohen Kohlendioxid-Emissionen verbundene Erz-Verhüttungen ersetzen und so einen wichtigen Beitrag zu einer längst 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.

Wasserstoff aus Biomasse

Die Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse wurde im **Projekt Sauerstoff-Transfermaterialien für die Biomassevergasung** [8] intensiv untersucht. Inwiefern die Teerbildung während der Biomassevergasung minimiert werden könnte, war die zentrale Fragestellung des vergangenen Berichtsjahres. Es konnte gezeigt werden, dass durch den Zusatz von katalytisch aktiven Metalloxidmineralien, wie Olivin, Sauerstoffübertragungsreaktionen initiiert werden können, welche die genannte Teerbildung stark reduzieren. Für die Produktion von regenerativen Energieträgern und Grundchemikalien - d.h. Wasserstoff und Synthesegas - aus Ressourcen des Standorts Schweiz sind diese Erkenntnisse von hoher Relevanz.

Speicherung von Wasserstoff

Die Speicherung von Wasserstoff ist eine der zentralen Fragestellungen für einen zukünftigen Einsatz dieses sekundären Energieträgers in mobilen Einheiten, also vor allem Autos und Bussen. Unter den drei gegenwärtig untersuchten Speichersystemen - 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** [9] sowie **Destabilisation of Metal Hydride Complexes and Theoretical Modelling** [10] vor allem materialwissenschaftliche Studien an Metallverbindungen mit hoher Wasserstoff-Speicherkapazität durchgeführt. Hauptaugenmerk galt den Hydriden leichter Metalle wie Bor und Aluminium. Es

zeigte sich, dass die entsprechenden Metallhydride wie NaBH_4 oder NaAlH_4 hohe Speicherkapazitäten von teilweise > 10 Gew.-% aufweisen und preisgünstig (< 20 CHF/kg) bereit gestellt werden können. Ein Wermutstropfen ist hingegen die hohe Desorptionstemperatur von > 300 °C, d.h. diese vielversprechenden Wasserstoff-Speichermaterialien haben eine für den technischen Einsatz zu hohe Desorptionstemperatur. Es wurde versucht, diesen Nachteil durch die Variation der Zusammensetzung (Austausch des Natriums mit Lithium, Rubidium oder Caesium) oder durch mechanisches Zerkleinern zu beheben. Es konnte gezeigt werden, dass beide Vorgehensweisen bis zu einem bestimmten Grad erfolgreich sind, aus wirtschaftlichen Gründen aber die physikalische Variante vorzuziehen ist.

Die Druckspeicherung von Wasserstoff wird seit einigen Jahren in internationalen Programmen zur technischen Reife, d.h. für einen Betriebsdruck von 700 Bar im Temperaturbereich bis 80 °C, entwickelt. Zur Zeit stehen sogenannten CNG-3 und CNG-4 Kohlefaser-Komposit tanks (CNG = Compressed Natural Gas) zur Diskussion. Während die CNG-3 Behälter aus einem Metall-Liner und dem Kohlefaser-Mantel aufgebaut sind, bestehen die CNG-4 Behälter aus Polyethylen-Liner und Kohlefaser-Mantel. In Bezug auf Gewicht und Sicherheit weisen die Vollkunststoff-Systeme Vorteile auf. Die Dichtheit bzw. die Diffusion durch deren Behälterwände ist insbesondere bei erhöhten Temperaturen noch nicht bestimmt und deshalb Gegenstand von Untersuchungen des Projekts **Hydrobar – Diffusionssperrschichten für Wasserstoff** [11]. Es konnte vorerst an industriell gefertigten CNG-4 Behältern der Firma *Ullit SA*, La Châtre, Frankreich, gezeigt werden, dass bei Raumtemperatur die Diffusion von Wasserstoff bei einem Druck von 200 Bar über längere Standzeiten minimal ist, also kein bemerkenswerter Druckverlust festgestellt werden kann. Mit einer eigens angefertigten Permeationsmesszelle konnte aber auch schon gezeigt werden, dass bei höheren Temperaturen die Dichtheit stark abnimmt. Als Gegenmassnahme dienen die im Projekt entwickelten Plasmabeschichtungen der inneren Polymeroberflächen mit Metallen und/oder Metalloxiden. Diese dünnen Filme wirken als effiziente und anpassungsfähige Diffusionssperrschichten.

Nutzung von Wasserstoff

Zur Zeit existiert weder in der Schweiz noch international eine ausgebaute Infrastruktur für ein auf Wasserstoff basierendes Energiesystem. Umso mehr gilt es, die vorhandenen und ausbaufähigen Kompetenzen und Nutzungsmöglichkeiten der Wasserstofftechnologie zu unterstützen, also auch Nischenanwendungen zu fördern. Das an der ETH-Zürich laufende Projekt **Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen Kohlendioxid-Quellen** [12] stellt eine vielversprechende Möglichkeit dar, ausgehend von CO_2 und Wasserstoff unter sogenannten überkritischen Bedingungen Grundchemikalien herzustellen. Es gelang, katalytische Prozesse zur Herstellung von Formamiden aus Amininen, von zyklischen organischen Carbonaten aus Epoxiden sowie der Substitution von umweltbelastenden Lösungsmitteln durch Synthesen in überkritischem CO_2 durchzuführen. Dieses Projekt ist ein Beispiel für vielversprechende Spin-Offs, die aus energierelevanten Forschungsaktivitäten abgeleitet werden können.

KOMPLEMENTÄRE TECHNOLOGIEN

Selektive Absorbersysteme

Auf der Basis des im Berichtsjahr abgeschlossenen Projekts **Materialien für nachhaltige Technologien in der Energieumwandlung und Energieeinsparung** [13] wurde ein Forschungsprojekt formuliert, dessen Ziel die Entwicklung neuer statischer Beschichtungen, die Optimierung bestehender Schichtsysteme für transparente und transluzente Teile von Gebäudehüllen, sowie später die Bearbeitung des Themenkreises optisch schaltbarer Materialien ist. Da diese Arbeiten vor allem im Bereich Gebäudetechnik Anwendungen finden und da die grundlegenden materialwissenschaftlichen Zusammenhänge zwischen chemischer Zusammensetzung, Aufbau, Abscheidung und Absorptionseigenschaften dünner Funktionsschichten in den vergangenen Jahren optimiert werden konnten, werden die geplanten Aktivitäten an das Programm *Gebäude* transferiert.

Nationale Zusammenarbeit

Für die nationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Wasserstoffforschung spielt *HYDROPOLE* [14] eine entscheidende Rolle: durch die Koordination der Aktivitäten zur Herstellung und Speicherung des sekundären Energieträgers bzw. Rohstoffs Wasserstoff konnte die Zusammenarbeit zwischen betroffenen Forschungsteams, aber auch die aktive Kooperation mit der Industrie verbessert werden. Es zeigte sich, dass in der Schweiz zum Thema Wasserstofftechnologie wissenschaftliche und technische Fachkompetenzen vorhanden sind: drei auf regenerativen Energien beruhende Herstellungsweisen - die photokatalytische Spaltung von Wasser, die solarthermische Spaltung von Wasser sowie die Hochdruck-Elektrolyse von Wasser werden kompetent betrieben. Als Beispiel kann hier die Hochdruckelektrolyse von Wasser genannt werden, die von der Firma *Djévahirdjian*

(Monthey) im industriellen Massstab erfolgreich betrieben wird. Das Zukunfts- und spezifische Einsatzpotential der drei Herstellungsvarianten wird durch den Austausch der unterschiedlichen Erfahrungen verlässlich abgeklärt und bewertet. Entsprechende Informationen wurden zweckmässig an interessierte und betroffene Institutionen und Akteure vermittelt.

Die Koordination des Programms *Wasserstoff / Solarchemie* mit den Programmen *Brennstoffzellen* und *Verbrennung* wurde intensiviert. Einerseits waren dafür der Wasserstoff als ein für die genannten Programme wichtiger Energieträger und andererseits das Themenfeld *Funktionsmaterialien und Prozesstechnik für regenerative Energiesysteme* ausschlaggebende Faktoren.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit wurde auf verschiedenen Ebenen intensiv gepflegt. Durch die Leitungsfunktion von Schweizer Vertretern in den beiden IEA-Programmen *SolarPACES* (Solar Power and Chemical Energy Systems) [15] und *Photoproduction of Hydrogen and Case Studies of Integrated Systems* [16] sind die nationalen Aktivitäten sehr eng mit den internationalen verknüpft. Kennzeichnend ist auch, dass vor allem die Forschungsarbeiten im Bereich der solarthermischen und der photoelektrokatalytischen Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser, aber auch Projekte wie das solare Kalkbrennen oder die materialwissenschaftlichen Arbeiten auf grosses internationales Interesse stiessen und Ausgangspunkt für befruchtende Kooperationen mit den folgenden Instituten und Institutionen waren:

- 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 Almeria, Tabernas, Spanien
- AG Solar, Nordrhein-Westfalen, Deutschland
- TÜV Saarland, Deutschland

Ebenso erfolgreich war die Beteiligung einzelner Projektnehmer an internationalen Symposien und Konferenzen. Zweifellos wird die in den vergangenen Jahren aufgebaute Fachkompetenz im Bereich Wasserstoff und Solarchemie international sehr geschätzt.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Solare Herstellung von Kalk

Das im Projekt *Solar Production of Lime* [17] über viele Jahre entwickelte und optimierte Verfahren zum solar betriebenen Brennen von Kalk wurde abgeschlossen. Die nun vorliegenden Erkenntnisse und empirischen Resultate erlauben es, bei Bedarf eine funktionstüchtige Produkti-

onseinheit planen und gegebenenfalls aufbauen zu können. Einsatzgebiete mit vielversprechenden Kenndaten sind in den sonnenreichen Regionen zu erwarten. Gerade dort sind wohl nicht sehr hohe Produktionsmengen, jedoch beträchtliche CO₂-Einsparpotentiale möglich, da biogene und/oder fossile Brennstoffe direkt substituiert werden können.

24-Stunden Solarkraftwerk bzw. die Speicherung von Solarenergie mit dem Solar-Ammoniak-Projekt

Das an der Australian National University bearbeitete dreistufige **Solar Ammonia Project** [18] (*SAP I* bis *SAP III*) wurde erfolgreich abgeschlossen. Während *SAP-I* die theoretischen Konzeptentwicklungsuntersuchungen im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit zwischen Industrie und Universität durchführte, konnte *SAP-II* die praktische Machbarkeit anhand einer der weltweit ersten solar betriebenen Kreislaufanlage experimentell bestätigen. *SAP-III* hatte nun abschliessend die Optimierung der Reaktionsführung durch Katalysatortests sowie Systembetriebssimulationen durchgeführt und erste Ökobilanzanalysen in Angriff genommen. Die Zukunft von *SAP* liegt nun in den Händen der Industrie, welche die Weiterentwicklung sowie potenzielle Kommerzialisierung dieser für Bandlast geeigneten Solarkraftwerktechnik nach marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten beurteilen wird.

Energiespeicherung mittels Drucklufttechnik

Bemerkenswerte technische Fortschritte konnten im Projekt **Druckluft - ein Energiespeicher der**

Zukunft [19] erzielt werden: die Anpassungsfähigkeit und Regelbarkeit der Druckluftspeicherung mittels entsprechender Ausgestaltung der verschiedenen Transformatoren-Bauarten für das BOP-A und BOP-B – Speicherprinzip, wobei eine der einfachsten Lösungen - die der pulsdauermodulierten Hydraulikeinheit mit Schwungrad - im Detail untersucht und als Funktionsmuster realisiert wurde. Technisch ausgedrückt ist die Zielsetzung die Verwirklichung einer Variabilität der Eingangs- bzw. Ausgangsleistung bis 1:10 mit bestmöglichem Wirkungsgrad unter Berücksichtigung der jeweiligen systembedingten Druckspanne. Diese Zielsetzung erforderte die gründliche Überarbeitung der hierfür eingesetzten Elemente wie Schwungrad, Ventilsteuerung, Kupplungssystem, Synchronmaschinen-Elektronik und Hydraulikblock, wobei der Elektromotor / Generator und die Hydraulikeinheit von der Entwicklungsaktivität ausgeschlossen und als Katalogelemente integriert wurden. Die Tatsache, dass Druckluft ein sehr attraktives Speichersystem für Elektrizität darstellt, führte dazu, dass das Projekt in Zukunft in das Programm *Elektrizitätsspeicherung und -transport* integriert werden soll.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

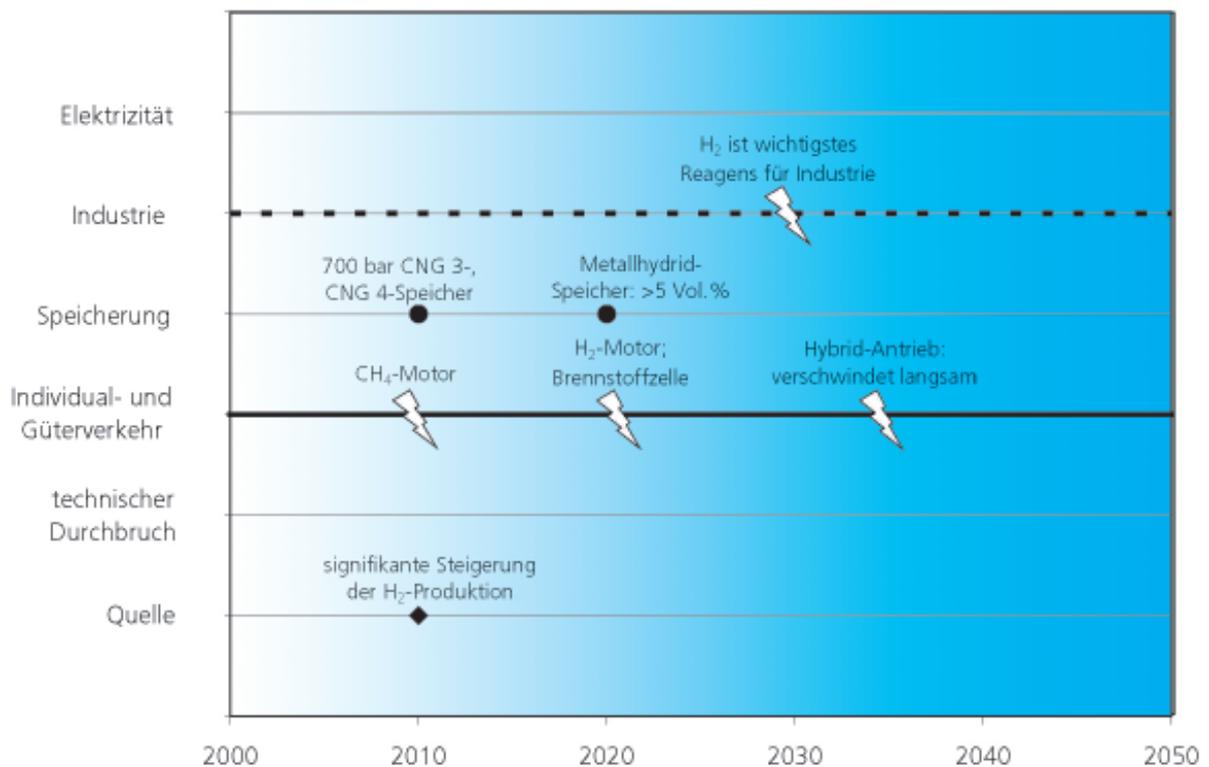
Im Berichtsjahr konnten die gesteckten Ziele des Programms *Solarchemie / Wasserstoff* grossenteils erreicht werden. Hervorzuheben sind die bemerkenswerten Fortschritte der Herstellung und Speicherung von Wasserstoff aufgrund der Fortschritte bei der Beherrschung der Verfahrenstechnik und der Bereitstellung der erforderlichen Funktionsmaterialien. Dies gilt insbesondere für die solarthermische und für die photoelektrokatalytische Wasserspaltung. In Beiden Verfahren gilt die Schweiz als international führend, was belegt, dass die in der Schweiz vorhandenen wissenschaftlich-technischen Fachkräfte durchaus fähig sind, praxisrelevante Lösungen für die Bereitstellung regenerativer Energieträger und Energietechnologien zu finden. Schwierig gestaltete sich jedoch die Umsetzung der Resultate, da geeignete Industriepartner nur in wenigen Fällen gefunden werden konnten. Der Export des erarbeiteten Know-hows gestaltet sich ebenfalls schwierig, was sich mit der aktuellen Zurückhaltung gegenüber innovativer Technologien bzw. mit einer weit verbreiteten Zurückhaltung für

Investitionen erklären lässt. Immerhin konnten einige Resultate patentiert werden und es bleibt zu hoffen, dass daraus industrielle Umsetzungen folgen. Im Rahmen der CORE-Retraite wurde der Übergang zur Wasserstoffgesellschaft diskutiert und eine *Roadmap* (siehe Figur 3) für den Bereich Wasserstofftechnologie entworfen [20].

Für den Bereich Solarchemie gilt es, im Verlauf von 2004 ebenfalls eine klar strukturierte *Roadmap* aufzustellen, anhand derer die vorhandenen Finanzquellen möglichst effizient eingesetzt werden können. Es gilt, vorab folgende Aufgaben zu lösen: die Aktivitäten der die Energieforschung tragenden Institutionen, vor allem des PSI, der ETH Zürich, der EPFL Lausanne und der EMPA, müssen noch besser koordiniert und auf Schwerpunktthemen ausgerichtet werden. Daneben sollen die Beiträge von Universitäten, Fachhochschulen und Industrieunternehmen möglichst synergetisch und komplementär zu einer nationalen Energieforschungsstrategie gebündelt werden. Erhebliche Potentiale bestehen in der Entwicklung

optimierter Funktionsmaterialien für regenerative Energiesysteme wie zum Beispiel Elektroden- und

Membranmaterialien für Elektrolyseure und für Brennstoffzellen.



Figur 3: Roadmap für die Gestaltung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Programmschwerpunkt Wasserstofftechnologie.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2003 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

Download der Berichte bei ENET unter www.energieforschung.ch

- [1] G. Calzaferri (gion.calzaferri@iac.unibe.ch) UNI Bern: **Photochemische und photoelektrochemische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie** (JB).
- [2] M. K. Nazeeruddin und M. Grätzel (Michael.Graetzel@icp.dc.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] P. von Zedtwitz (peter.vonzedtwitz@pre.mavt.ethz.ch) und A. Steinfeld, ETH-Zürich: **Solar Decarbonization of Fossil Fuels – Clean Energy Technologies for CO₂ Mitigation** (JB).
- [5] R. Palumbo (robert.palumbo@psi.ch) und A. Steinfeld (aldo.steinfeld@psi.ch) PSI Villigen: **The Solar Production of Zinc** (SB), ENET 230116.
- [6] M. Sturzenegger (m.sturzenegger@psi.ch) I. Alxneit, M. Musella, H. R. Tschudi, PSI Villigen: **Solarchemische Beiträge zur Reduktion des CO₂-Ausstosses** (JB).

- [7] D. Cannavò und T. Gerber (thomas.gerber@psi.ch) PSI Villigen: **Darstellung und Spektroskopie von ZnO bzw. Zn_xO_y in der Gasphase** (JB).
- [8] S. Biollaz (serge.biollaz@psi.ch) M. Sturzenegger und S. Stucki, PSI Villigen: **Projekt Sauerstoff-Transfermaterialien für die Biomassevergasung** (JB).
- [9] A. Züttel (andreas.zuettel@unifr.ch) UNI Fribourg: **Wasserstoffspeicherung in Metall- und komplexen Hydriden** (JB).
- [10] K. Yvon (klaus.yvon@cryst.unige.ch) UNI Genève: **Destabilisation of metal hydride complexes and theoretical modelling** (JB).
- [11] E.M. Moser (e.m.moser@eig.ch) Incoat GmbH, Löhningen und Ecole des Ingenieurs, Genève: **Hydrobar – Diffusionsspererschichten für Wasserstoff** (JB).
- [12] A. Baiker (baiker@tech.chem.ethz.ch) ETH-Zürich: **Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen Kohlendioxid-Quellen** (JB).
- [13] 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).

Liste der P+D-Projekte

- [14] **Hydropole** (www.hydropole.ch) Schweizerisches Wasserstoff-Kompetenzzentrum, c/o IWA, Schwerzenbach (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 (girasola@cyberone.com.au) Australian National University, Canberra, Australien: **Leitung des IEA-Programms Photoproduction of Hydrogen and Case Studies of Integrated Systems** (JB).
- [17] A. Meier (annton.meier@psi.ch) PSI Villigen, und E. Bonaldi, QUALICAL, Bergamo, (I): **Solare Herstellung von Kalk** (SB).
- [18] O. Becker, K. Lovegrove and A. Luzzi (girasola@cyberone.com.au) Australian National University, Canberra, Australien: **Solar Ammonia Project** (SB).
- [19] I. Cyphelly (cmr@ran.es) Les Brenets: **Druckluft - Ein Energiespeicher der Zukunft** (JB).

Referenzen

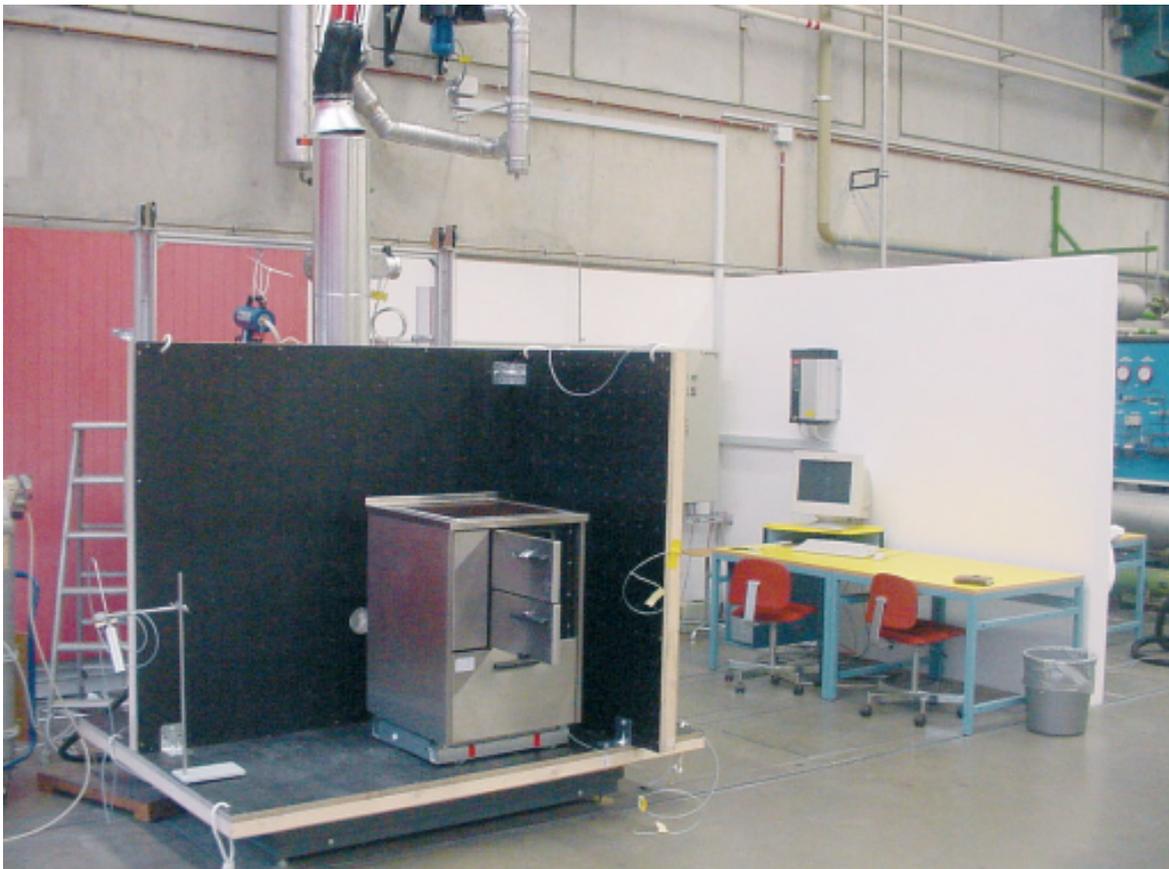
- [20] **Jahresbericht 2003 der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE**, Download unter: <http://www.energie-schweiz.ch/internet/00275/index.html?lang=de>.

BIOMASSE

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Daniel Binggeli; Bruno Guggisberg

daniel.binggeli@bfe.admin.ch bruno.guggisberg@bfe.admin.ch



Prüfstelle für Holzfeuerungen an der Fachhochschule beider Basel (FHBB) in Muttenz

Seit Oktober 2003 ist der neue Prüfstand in Betrieb. Als erste Anlage wurde der abgebildete Holzherd geprüft.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

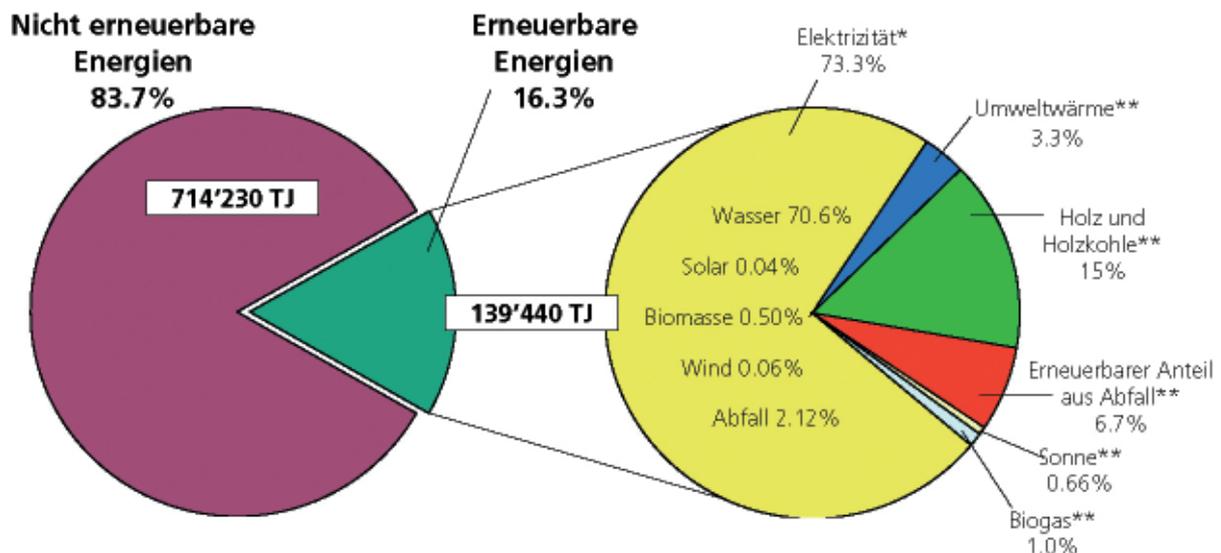
EINLEITUNG

Das Forschungsprogramm *Biomasse* konzentriert sich auf die effiziente Umwandlung von Biomasse in Wärme, Strom und Treibstoff. Es soll mit-helfen, 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. Die Energieproduktion aus Biomasse erbrachte 2002 rund 4.1% des schweizerischen Gesamtendenergieverbrauchs (thermisch und elektrisch) resp. 25.3 % des erneuerbaren Endverbrauchs. Das mittelfristige politische **Ziel** des Bundes ist jedoch eine **Verdoppelung der Nutzung** von Biomasse.

- c) Erhöhung und **Verbesserung** der **Gesamtwirkungsgrade** bei der energetischen Nutzung von der Ernte bis zur Umwandlung
- d) Umlegen und Ausscheiden von Agrarflächen für den Energiepflanzen-Anbau, welche heute für die Tierhaltung und Lebensmittelproduktion genutzt werden. (Energiepflanze anstatt Lebensmittel und diese kompensieren durch Import)
- e) Import von Biomasse zur energetischen Verwertung als Brenn- und Treibstoff

PROGRAMMSCHWERPUNKTE

Drei Schwerpunkte: (a) vermehrte Nutzung von Biomasse, (b) Optimieren der biogenen Stoffflüsse



Figur 1: Aufteilung des gesamt-schweizerischen Endenergieverbrauchs 2002 auf erneuerbare und nicht-erneuerbare Energiequellen (*Strom; **Wärme). Die Energie aus Biomasse wird im Endverbrauch zum grössten Teil **thermisch** (ca. 89 %), **elektrisch** (ca. 10 %) und zu einem geringen Anteil als **Treibstoff** (<1%) genutzt.

Die verfügbare Menge an Biomasse ist in der Schweiz auf Grund der Landesgrösse und der klimatischen Verhältnisse beschränkt. Das energetisch nutzbare Potential ist jedoch noch bei weitem nicht ausgeschöpft. Die verstärkte energetische Nutzung der Biomasse kann grundsätzlich über 5 Wege erfolgen:

- a) **vermehrte Nutzung** der Biomasse aus Wäldern und Brachflächen
- b) **Optimieren** der biogenen **Stoffflüsse** (u.a. Abfälle) unter Berücksichtigung der gesetzlichen Randbedingungen

se und (c) Verbesserung der Gesamtwirkungsgrade wurden für Forschung und deren Umsetzung festgelegt, unter Berücksichtigung der Systemgrenze Schweiz, den gesetzlichen Rahmenbedingungen und des *Konzepts der Energieforschung des Bundes 2004-2007* [34].

Zur energetischen Nutzung stehen aufgrund der Schwerpunkte folgende biogene Stoffe im Vordergrund: Holz, biogene Industrieabfälle, biogene Siedlungsabfälle, Klärschlamm, landwirtschaftliche Abfälle und Pflanzen aus landwirtschaftlichen Stilllegungsflächen.

Folgende Prozesse und **Umwandlungstechnologien** stehen im Mittelpunkt: **Verbrennen, Vergasen** und **Vergären**.

ANVISIERTE ZIELE

Generelles und langfristiges Ziel ist es, die Voraussetzungen für die vermehrte energetische Nutzung der Biomasse weiter zu verbessern. Um dieses Ziel zu erreichen gibt es folgende Möglichkeiten:

- Verbesserung der Rahmenbedingungen (Vorschriften und Gesetze, Anreize schaffen)
- Steigerung der Energieeffizienz
- Entwicklung wirtschaftlicher Anlagen und Systeme
- Reduktion von ökologischen Auswirkungen (Emissionen)
- Aufbau und Erhalt einer Qualitätssicherung

Im Berichtsjahr wurden folgende Ziele anvisiert:

- Grundlagen-, Qualitätssicherungsprojekte und Erfolgskontrollen durchführen in Technik und Aus+Weiterbildung

- Know-how für Planung, Bau und Betrieb zur Anwendung in privaten, industriellen, kommunalen und landwirtschaftlichen Biomasseanlagen ausbauen
- Begleitforschung für Holz-Vergasungsanlagen bereitstellen
- Förderung von Biogas als Treibstoff (direkter CO₂-Ersatz)
- Auswerten von bestehenden P+D-Anlagen im Bereich landwirtschaftlicher Co-Vergärung und Unterstützen von Neuinstallationen
- vermehrtes Umsetzen der Resultate aus der langjährigen Biomasseforschung durch das Realisieren von P+D-Anlagen in allen Bereichen
- generell grössere Projekte mit besonderer Bedeutung unterstützen, Mittel konzentrieren
- neue Erhebung des Biomassepotenzials in der Schweiz für die politische Diskussion

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

BIOMASSE UMWANDELN

a) Biomasse verbrennen und vergasen

Die **Systemoptimierung automatischer Holzfeuerungen** [1a] hat zum Ziel, dass bestehende automatische Holzfeuerungen optimal betrieben werden. Sie umfasst eine Situationsanalyse und die Erarbeitung eines detaillierten Massnahmenplans betreffend Brennstoff, Technik und Betrieb. Rasch realisierbare Massnahmen werden sofort umgesetzt, während die Betreiber bei der Planung grösserer Investitionen unterstützt werden. In Phase 2 wird die Systemoptimierung an 26 weiteren Anlagen in der ganzen Schweiz durchgeführt. Im Berichtsjahr konnte die Systemoptimierung an 13 Anlagen abgeschlossen werden. Die Umsetzung der Massnahmen ist teilweise bereits erfolgt und zeigt, dass die Massnahmen zum Teil erhebliche Verbesserungen in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Wirkungsgrad und Emissionen ermöglichen.

Partikelemissionen aus vollständiger Holzverbrennung sind grösstenteils Salze, während Dieselmotoren hauptsächlich Russpartikel emittieren. Im interdisziplinären Forschungsprojekt **Wirkung von Verbrennungspartikeln** [1b] wird ein Screening-Test zum Vergleich der Gesundheitsrelevanz

von Partikeln aus vollständiger Holzverbrennung, aus unvollständiger Holzverbrennung und aus Dieselmotoren durchgeführt. Für eine orientierende Bewertung werden dazu die Zytotoxizität und die Mutagenität der gesammelten Partikelproben mit in-vitro-Tests untersucht. Im Jahr 2004 soll der Hauptteil der Arbeiten durchgeführt werden. Die Probengenerierung sowie die ersten Zelltests inklusive geeigneter Probenaufbereitung werden im ersten Halbjahr 2004 durchgeführt, während im zweiten Halbjahr weitere Zelltests und die zugehörige Auswertung geplant sind.

Ziel des Projekts **Low-Particle-Pelletfeuerung** [1c] ist, ein Feuerungskonzept für den Einsatz bei Pelletfeuerungen im Leistungsbereich von 100 kW bis 500 kW zu untersuchen. Durch Primärmassnahmen soll eine Verminderung der Staubemissionen zur sicheren Einhaltung eines Staubgrenzwertes von 50 mg/Nm³ (bei 13 Vol.-% O₂) ermöglichen. Dazu wird eine Prototypanlage realisiert, bei der die Bauweise, die Geometrie und die Regelung für das neue Funktionsprinzip mit hohem Glutbett und sehr tiefem Glutbettluftüberschuss optimiert sind. Im Berichtsjahr wurde die Anlage ausgelegt, für das Jahr 2004 sind der Bau und die Erfolgskontrolle der Prototypanlage geplant.

Auslegung und Optimierung von Holzspeicheröfen [3a]: Der Schweizerische Verband der Hafner- und Plattengeschäfte, VHP hat ein neues Planungswerkzeug (siehe: www.ideexp.ch) geschaffen, das dem Ofenbauer erlaubt, die energie-technische Einbindung der Feuerung in ein Haus richtig zu dimensionieren. Es wurden Grundlagen erarbeitet, auf die das rechnergestützte Planungsmittel aufbaut. Laboruntersuchungen zum thermodynamischen Verhalten von charakteristischen Ofenbauteilen sowie numerische Verfahren zur Simulation sind Teile der wissenschaftlichen Arbeiten. Der VHP ist über seine Aus- und Weiterbildungsinfrastruktur sowie seine Vertriebskanäle besorgt, dass das Planungswerkzeug in der Praxis angewendet wird.

Die Untersuchung: **Wirksamkeit neuer Abscheidetechniken in Holzfeuerungen bezüglich Feinpartikel** [3b] zeigt, dass bei allen gemessenen Anlagen die Staubwerte um das 3 bis 30 Fache unter den Grenzwerten der Schweizer Luftreinhalte-Verordnung liegen. Elektro- und Gewebefilter erreichen hohe Abscheidegrade von bis zu 99.9% und Abgaskondensationsanlagen liegen bei rund 50% Abscheidung.

Bei den Schweizerischen Herstellern und Importeuren für Holzfeuerungen bestand der Bedarf für eine heimische **akkreditierte Prüfstelle für Holzfeuerungen** [4]. Der Aufbau der akkreditierten Prüfstelle wurde in Zusammenarbeit mit dem Ökozentrum Langenbruck und der Fachhochschulen beider Basel und Zentralschweiz durchgeführt. Zunächst wurden die, für das Qualitätsmanagement notwendigen Unterlagen erstellt und METAS (Metrologie und Akkreditierung Schweiz) als akkreditierende Stelle vorgelegt. Parallel dazu wurden die notwendigen Einrichtungen der Prüfstelle beschafft und der Prüfstand aufgebaut. Im Juli wurden die technischen Dokumente bei METAS eingereicht. Im Oktober wurde im Beisein von METAS und einem Fachexperten die erste Prüfung an einem Holzherd vorgenommen (s. Titelbild Programmbericht). Der Aufbau der akkreditierten Prüfstelle und die Schaffung der Infrastrukturen zur Aufnahme des Prüfbetriebes im Januar 2004 wurde termingerecht und erfolgreich abgeschlossen. ÖZL und FHBB sind im Normengremium CEN/TC 295 engagiert. Mit der *Vereinigung der kantonalen Feuerversicherung (VKF)* wurde vereinbart einen Mitarbeiter der Prüfstelle in die fachtechnische Kommission der VKF zu delegieren.

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 wird im Januar/Februar 2004 stattfinden. Und die Datenerfassung und Datenauswertung für die Übergangszeit, die nicht wie vorgesehen im Oktober/November 2003 stattfinden konnte, muss im März/April 2004 nachgeholt werden.

Methan aus Holz [20]: Das Projektteam will innerhalb von 8 Jahren eine erste 20 MWth-Anlage realisieren, welche aus Holz erdgasnetztaugliches Methan zu wirtschaftlich interessanten Bedingungen herstellen kann. Der nächste Schritt auf dem Weg zur Realisierung einer solchen Anlage ist, im kW-Massstab den techno-ökonomischen Nachweis zu erbringen, dass Methan aus Holz hergestellt werden kann. Dazu wird am PSI eine Pilotanlage (2 bis 10 kW) errichtet, welche u.a. für Langzeitversuche (1000 h) geeignet ist. Diese Pilotanlage soll im Jahr 2004 in Güssing mit einem industriellen Holzvergaser verknüpft werden (8 MWth). Dieser FICFB-Vergaser (Fast Internally Circulating Fluidized Bed) liefert ein stickstoffreies und methanreiches Synthesegas, welches besonders geeignet ist für die nachgeschaltete Methanisierung. Bei einem geeigneten Betriebspunkt soll über 1000 h ein Teilstrom des Vergasers unter Druck in Methan umgewandelt werden.

Biogenes Methan durch hydrothermale Vergasung [20]: In diesem Projekt wird ein hydrothermales Vergasungsverfahren für nasse Biomassesortimente entwickelt, mit dem Ziel, die Biomasse vollständig zu Methan und CO₂ zu vergasen und Nährsalze zurückzugewinnen. Es wurden Laborversuche mit 9-10 Gew% Holz in einem absatzweise betriebenen Hochdruck-Reaktor bei 390-400 °C und ca. 300 bar durchgeführt. Das Holz konnte vollständig zu CH₄, CO₂ und H₂ vergast werden. In einem ersten Versuch in einer neuen kontinuierlichen Laboranlage zum Testen von Katalysatoren konnte Ethanol bei 400°C und 300 bar vollständig zu 72% CH₄, 21% CO₂ und 7% H₂ vergast werden.

b) Biogene Abfälle vergären

Energie à partir du petit-lait: comparaison des filières biogaz et bioéthanol [6]: Deux filières, la méthanisation et la production de bioéthanol, sont en mesure d'offrir des solutions de rechange pour le traitement et la valorisation des

quelques 1,5 millions de m³ de petit-lait produits en Suisse lors de la fabrication de fromage. L'expérimentation sur un réacteur anaérobie pilote de 1000 L installé dans la *Fromagerie André* à Romanel s/Morges (VD) a démarré à fin novembre 2003. Cette première partie du projet, d'une durée de six mois, devrait permettre de mettre en évidence les conditions optimales de fonctionnement d'une installation de biogaz intégrée à une fromagerie de taille moyenne, pour le traitement *in situ* du petit-lait. La contribution énergétique du biogaz à la consommation énergétique de l'entreprise pourra ainsi être évaluée. Les démarches destinées à fixer les cadres de l'élaboration des écobilans comparés des deux filières ont été engagées avec *ALCOSUISSE* et ses mandataires, le bureau d'ingénieurs *PLANAIR* et l'EPFL-LASEN. Le canton de Fribourg a décidé d'étudier l'application du concept de méthanisation développé dans le cadre de ce projet, pour trois fromageries représentatives.

Vorstudie «Ökobilanz von Energieprodukten» [8]: 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.

Klärgasverstromung: Zertifizierung und Vermarktungsmodell für Ökostrom an Fallbeispielen [9]: Die Produktion von Biogas aus Kläranlagen und daraus die Produktion von erneuerbarer Energie (Strom und Wärme) ist energetisch und ökologisch sinnvoll. Damit der Strom aus Klärgas eine bessere Vermarktungschance hat, wurden in diesem Projekt die Grundlagen für die Zertifizierung erarbeitet. Die Gutachter kommen zum Schluss, dass auf Grund der durchgeführten Analyse das Label *naturemade star* gemäss *VUE* für Strom aus Kläranlagen zu empfehlen ist. Zwei Kläranlagen (ARA-Thunersee, ARA-Canius Vaz/Oberbaz) haben bereits Zertifizierungen durchgeführt. Gemeinsam mit der ARA-Thunersee und der *BKW* wird nun einerseits ein Vermarktungsmodell entwickelt und andererseits die Vermarktung von Klärgasstrom erstmals in der Schweiz realisiert.

Valorisation énergétique de matières organiques (VEMOT) - Avant-projet [10]: Bei der

Produktion von Biodiesel (Rapsmethylester - RME) fallen unter anderem flüssige hochkonzentrierte 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 anderer, ähnlicher Abwässer z.B. aus der Chemie- und Pharmaindustrie eingesetzt werden. Es soll nun ein geeigneter Standort für eine Pilotanlage gefunden werden.

Membranevaluation zur Vergärung von Gülle im Membranreaktor (UF-Membran) [11]:

Ziel der Studie war die Erarbeitung von prozesstechnischen Grundlagen für den Bau und Betrieb einer Ultrafiltrationsanlage im Einsatz mit vergorener Gülle. Das Hauptinteresse bildete die Eignung des Membranmaterials. Es wurden zwei verschiedene organische Membranen untersucht und mit einer erprobten keramischen Membrane verglichen. Die Ergebnisse aus den Versuchen mit organischen Ultrafiltrationsmembranen zeigen, dass diese Membranen für Gülle geeignet sind. Im Vergleich zu keramischen Membranen sind höhere Durchsatzleistungen erzielt worden. Kostenkalkulationen verdeutlichen tiefere Investitions- und Betriebskosten. Ebenfalls sind der erforderliche Leistungsbedarf sowie der Energieaufwand geringer. Die Kombination der Ultrafiltration mit einer Biogasanlage soll an einer Pilotanlage weiterverfolgt werden.

Messkampagne für eine solare Klärschlamm-trocknungsanlage in Bilten GL [12]:

Die Entwässerung von Klärschlamm hilft die Kosten für dessen Entsorgung zu senken. Die Trockensubstanz-Gehalte mechanischer Entwässerungsverfahren liegen bei höchstens 30 bis 35 %. Weitergehende Entwässerung erfordert energieaufwändige Trocknungsverfahren. Bei dem in Bilten zum Einsatz gelangenden Verfahren sorgt Sonnenenergie für die notwendige Wasserverdampfung. Das resultierende Granulat mit Trockensubstanzgehalten von bis zu 90 % kann mit herkömmlichen Geräten geladen, gefördert, zwischengelagert oder ausgestreut werden.

Molke-Biogasanlage mit BHKW für die Molkerie Lateria Engadina (LESA) in Bever [13]:

Die Vergärung von Molke und damit deren energetische Nutzung beispielsweise mittels einem Blockheizkraftwerk (BHKW) stellt in der Schweiz ein Novum dar. Das Projekt ist aus energetischer und ökologischer Sicht (dezentrale Energieerzeugung, Einsparung von Transporten) sehr interessant. Die Vorstudie kommt zum Schluss, dass eine

attraktive Alternative zur derzeitigen Verwertung in der Einbringung der Molke in die Biogasanlage der Ara-Sax besteht.

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 recycelt. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Effizienz der Perkolation von Grüngut und der anschliessenden Vergärung durch Optimierung chemisch-physikalischer, verfahrenstechnischer und mechanischer Parameter deutlich zu steigern.

Teilstatistik Biogas 2002 [15]: In der Biogasstatistik 2002 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. Es sind die Entwicklungen von 1990 bis 2002 dargestellt.

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 Klärschlammdeponierung 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 recycelt. 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.

Vergärung von Pulpa aus der Kaffee-Produktion [18]: Bei der Ernte von Kaffeebohnen und der Produktion von getrockneten Kaffeebohnen fallen am Produktionsstandort pro Tonne Kaffeebohnen ca. 2 Tonnen feuchte Kaffeeschalen (Pulpa, Broza) an. Dieses Material stellt eine wertvolle Energiequelle dar und kann anaerob zu Biogas vergoren werden. In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass Pulpa als Monocharge anaerob umgesetzt werden kann. Es sind keine Nährstofflimitationen und höchstens moderate Substrathemmungen in konzentrierter Pulpa vorhanden. Das Biogaspotential liegt bei 0.38 m³ Biogas / kg organischer Substanz. Die Abbaubarkeit der organischen Substanz liegt bei über 70%.

c) Biotreibstoffe

Vorstudie „Biogas vom Bauer wird zum Treibstoff von morgen“ [19]: Im Rahmen dieser Vorstudie wurden die technischen, logistischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten der landwirtschaftlichen Biogasproduktion für den Treibstoffmarkt anhand einer abgegrenzten Modellregion im Kanton Luzern untersucht. Gründend auf den Erkenntnissen der vorliegenden Vorstudie, erscheint die Ausarbeitung von Realisierungskonzepten und der Bau grösserer, gewerblicher Anlagen, insbesondere für die Direkteinspeisung des aufbereiteten Biogases ins Erdgasnetz als ökologisch und ökonomisch sinnvoll. In der betrachteten Modellregion ist die Kombination der Energieproduktion aus landwirtschaftlichem Biogas mit der technischen Aufbereitung der Gülle als interessante Option zu prüfen.

Nationale Zusammenarbeit

Die meisten Projekte wurden direkt mit der Industrie und zusammen mit diversen Fachhochschulen, der ETH oder privaten Organisationen durchgeführt. Dieses Vorgehen erlaubt einen effizienten Technologietransfer von der Forschung in die Wirtschaft. Die Finanzierung von Projekten wird laufend schwieriger und zeitaufwändiger. Die Projektpartner werden nur teilfinanziert und haben demzufolge ihr Interesse in Eigenleistungen

auszuweisen. Forschungsarbeiten mit den Unternehmen im Bereich Verbrennung sind schwieriger zu realisieren, weil bei den meisten Produkten auf dem Markt heute schon gesetzliche Rahmenbedingungen eingehalten werden und daher Typenprüfungen vorliegen müssen. Für neue kostspielige und risikoreiche Entwicklungsprojekte fehlen der Industrie oft die Mittel.

Internationale Zusammenarbeit

Die Aktivitäten im Rahmen des *IEA Bioenergy Agreement* (www.ieabioenergy.com) mit den Tasks *Verbrennung*, *Vergasung* und *Vergärung* sind im Berichtsjahr in unveränderter Art weiterverfolgt worden. Im Weiteren wurde beschlossen, dass das Engagement der Schweiz in der IEA Bioenergy für das nächste Triennium (2004 – 2006) im gleichen Rahmen erfolgen soll.

Die Ziele der Vertretungen in der **International Energy Agency (IEA), Bioenergy Task 32 Biomass Combustion and Cofiring** [1b] (www.ieabcc.nl) und **IEA Task 33, Thermal Gasification of Biomass** [2] (<http://www0.gastechnology.org/pub/iea>) sind die Sicherstellung des Erfahrungs- und Informationsaustausches mit den Mitgliedstaaten über Aspekte der Verbrennung/Vergasung von Biomasse, die Zusammenarbeit auf ausgewählten Gebieten, die Mitwirkung bei der Festlegung zukünftiger Schwerpunkte für Forschung, Entwicklung und Information, den internationalen Stand der Technik und Gesetzge-

bung zu kennen sowie die schweizerischen Anstrengungen bekannt zu machen.

Die Vertretung der Schweiz im **IEA Bioenergy Agreement, Bioenergy Task 37, Energy from Biogas and Landfill Gas** [7] (www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37) bezweckt den Austausch und die Verbreitung von Informationen zur Produktion und Verwendung von Biogas, die Anregung neuer Projekte und die Erhöhung des Bekanntheitsgrads der anaeroben Vergärung von organischen Abfällen sowie der Biogasaufbereitung und -nutzung von Abfalldeponien. Am letzten ExCo-Meeting im Oktober 2003 in Campinas (Brasilien) wurde die Fortsetzung der Task beschlossen.

Die EU nimmt mit ihren zahlreichen Programmen zukünftig eine immer wichtigere Rolle ein. Im Bereich Biomasse beteiligt sich die Schweiz am Projekt *RENEW*, ein Projekt des 6. EU-Rahmenprogramms und am EU Biomass Gasification Network (www.gasnet.uk.net).

Pilot- und Demonstrationsprojekte

a) Biomasse verbrennen und vergasen

Beim Projekt **Abgaskondensation am Wärmeverbund in Schwanden** [21] wurde eine kombinierte Kondensations- und Economiser-Anlage nach einer Holzsnitzelfeuerung eingesetzt, mit der es während der gesamten Heizperiode möglich ist, Wärme für Heizzwecke zur Verfügung zu stellen. Ziele sind eine Effizienzsteigerung durch die Nutzung der Abwärme aus den Rauchgasen und die Reduktion der Staubemissionen. Nach über 2 Jahren, die für den Aufbau, die Inbetriebsetzung, viele Untersuchungen und einem gros-

sen Umbau verwendet wurden, kann die Anlage für den Winter 2002-2003 eine Wärmerückgewinnung (WRG) von über 21 % vorweisen. Jedes WRG-Prozent der Kondensationsanlage bedeutet nicht nur eine Einsparung beim Holzsnitzel-Verbrauch, sondern in der gleichen Grössenordnung auch eine Schadstoffreduktion. Dazu kommt ein hoher Abscheidegrad der Staubpartikel von rund 50% durch den so genannten Wäschereffekt.

An der **Holzvergasungsanlage der Xylowatt SA** [22] wurden im Berichtsjahr Modifikationen durchgeführt, die es erlauben, geschreddertes

Holz zu vergasen und Phenole und Partikel zurückzuhalten. Im Jahr 2004 wird angestrebt, die Leistung mit einem neuen auf Holzgas angepassten Swissmotor wesentlich zu steigern. Auch sollen weitere Vergasungsversuche mit anderen Biomassesortimenten gemacht werden, welche die Wirtschaftlichkeit der Vergasungsanlagen beträchtlich beeinflussen könnten.

Mit dem **Forschungs- und Begleitprojekt an der Holzvergasungsanlage Pyroforce im AC-Zentrum Spiez** [23] kann mittels Contracting die Anlage weiter betrieben werden. Die vollständig im System eingebundene Vergaser-Pilotanlage hat bis heute rund 4000 Motoren-Betriebsstunden auf halber Leistung absolviert. Im weiteren Verlauf geht es darum die BoB-Zeiten (BoB Betrieb ohne Beobachtung) weiter auf 5-8 Stunden zu erhöhen und Betriebssicherheit zu erlangen.

b) Biogene Abfälle vergären

Bioenergie, Protein und Fasern aus Gras [24]: Seit Sommer 2001 war in Schaffhausen die erste grosstechnische Schweizer Grasraffinerie in Betrieb. Sie beinhaltet neben der Grasverarbeitung zu Fasern und Protein die Verwertung der flüssigen Rückstände in einem Biogasreaktor. Die P+D-Anlage wurde durch die Bioenergie Schaffhausen betrieben und produziert bei Volllast jährlich 2000 MWh an Ökostrom (10% Eigenbedarf) und 3000 MWh an Ökowärme (50% Eigenbedarf). Während einer ersten 8 monatigen Betriebsphase der P+D-Biogasanlage wurde ein intensives Monitoring der wichtigsten Betriebsparameter durchgeführt. Die Massenbilanzen für Kohlenstoff und Stickstoff wurden erstellt und die Entwicklung des anaeroben Pelletschlammes wurde charakterisiert. Aus den betrieblichen Daten wurden die Leistungskennzahlen des EGSB-Bioreaktors ermittelt. Das erste Betriebsjahr der Grasraffinerie war geprägt durch die nur teilweise Ausschöpfung der Verarbeitungskapazität von Gras und durch den Wegfall der Proteinabtrennung und -Produktion. Die technischen Probleme konnten zwar mehrheitlich behoben werden, aber die Betreiberin musste aus Liquiditätsgründen im Berichtsjahr den Betrieb einstellen.

Lupo AG - Biogasverwertung mit BHKW [25]: 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.

Kompakt-Biogasanlage für die Landwirtschaft mit effizienter BHKW-Technik [26]: Leider konnte mit dem Bau der Kompakt-Biogasanlage noch nicht begonnen werden. Das Bauvorhaben löste bei den kantonalen Bewilligungsbehörden (Kanton Bern) Diskussionen zur Umsetzung des Raumplanungsgesetzes aus. Insbesondere der Bau in der Landwirtschaftszone wurde diskutiert. Nach anfänglichen negativen Entscheiden konnte im Sommer 2003 eine Einigung bezüglich des Mischungsverhältnisses Gülle/Co-Substrate erzielt werden. Da das Vorhaben als UVP-pflichtig taxiert wurde, musste ein Umweltverträglichkeitsbericht erstellt werden. Im Oktober 2003 wurde das Baugesuch erneut eingereicht. Die Baubewilligung wurde nun erteilt.

Biogaz agricole Installation de production de biogaz à partir de fumier et autres cosubstrats [27]: L'année 2003 a été consacrée à la mise au point de dossiers administratifs liés à la procédure de Plan partiel d'affectation (PPA) requise pour la réalisation du projet de codigestion de fumiers et autres cosubstrats solides. La procédure a notamment consisté à soumettre le PPA et l'étude d'impact à la municipalité de Champtauraz et aux services de l'état de Vaud (CIPE). La capacité de traitement envisagée reste fixée à 10'000 tonnes an (fumier de bovins, de chèvres et de chevaux + contenus de panses, déchets maraîchers, gazons, etc.). Une évaluation détaillée des contraintes et frais d'exploitation a conduit à opter pour le procédé à alimentation discontinu *BIOFERM*, de préférence au système *KOMPOGAS* initialement retenu. L'investissement devrait être maintenu au niveau initialement envisagé.

Kompaktbiogasanlage Ott, Kanton Schwyz [28]: Die Betriebsauswertung der ersten 8 Monate des ersten Betriebsjahres zeigt, dass die Anlage technisch sehr zufriedenstellend läuft und durchaus plausible Daten lieferte. Leider ist das Umfeld der Anlage geprägt einerseits von Repressionen der *CKW* betreffend Rücklieferatarife für Ökostrom und andererseits von Verhandlungen mit der Firma *Baer* über die Annahme von Co-Substraten. Im Weiteren wurde die Anlage durch einen SCR-Katalysator ergänzt (siehe Projekt [30]).

Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle der Co-Vergärungsanlage E. Flachsmann AG [29]: Die Firma in Wädenswil, betreibt eine Wärmekraftkopplungsanlage mit Biogas aus vergärten festen und flüssigen Produktionsabfällen sowie eine Absorptionskältemaschine zur Produk-

tion von Prozess- und Klimakälte. Aufgrund der Erfahrungen in den ersten Betriebsjahren, in denen sich einige betriebstechnische Mängel zeigten, stellte sich die Frage nach einer Optimierung der Biogasanlage. Im Rahmen des Projekts wurden die Betriebsprozesse und Energieflüsse der Co-Vergärungsanlage detailliert untersucht und die erkannten Probleme sowie die erarbeiteten Optimierungsmassnahmen beschrieben. Mit der vorgesehenen Umsetzung der Optimierungsmassnahmen ist eine höhere Betriebssicherheit sowie eine verbesserte Wirtschaftlichkeit zu erwarten.

BHKW-Optimierung und SCR-Katalysator Kompaktbiogasanlage Küssnacht [30]: Für Biogasanlagen in der Landwirtschaft werden vorwiegend Zündstrahlmotoren eingesetzt. Diese BHKW haben einen guten elektrischen Wirkungsgrad, sind sehr zuverlässig und haben tiefe Service- und Unterhaltskosten. Im vorliegenden Projekt sollen mit einem SCR-Katalysator die Abgaswerte des neuen BHKW in Küssnacht a.R. um rund 80% gesenkt und dadurch die Qualität des produzierten Ökostroms verbessert werden. Vorversuche haben folgende Resultate gebracht: Katalysatorwaben in der bestehenden Biogasanlage waren erfolgreich; Konstruktion und Aufbau der Katsteuerung und des Katalysators waren ebenfalls erfolgreich; anfängliche Probleme mit hohem Druckverlust, tiefen Abgastemperaturen und Ablagerungen im Ammoniaktaktventil konnten behoben werden. Die ersten Betriebsmonate lieferten erfreuliche Umsatzraten für den Katalysator. Anfängliche Bedenken über Katalysatorgifte im Abgas und Zündaussetzer des Motors machten bisher keine Probleme. Das Forschungsprojekt verläuft sehr vielversprechend.

Molke-Biogasanlage mit Blockheizkraftwerk für die Molkerei Latoria Engiadinaisa SA, Bever [31]: Der aktuelle Entsorgungspfad der LESA-Molke ist mit erheblichen Kosten ver-

bunden, die sich um ca. Fr. 210'000 pro Jahr bewegen. Wichtigste Kostenverursacher sind die Umkehrosmoseanlage mit Zwischenlagerung, die Abwasserentsorgung und der Transport. Die derzeitige Entsorgung bewirkt zudem eine beträchtliche Umweltbelastung durch den hohen Frischwasserverbrauch, die Gewässerbelastung durch Einleitung von Frischwasser und Permeat in die Kanalisation und durch Betriebsstörungen der Umkehrosmoseanlage, sowie die aufwändigen Transporte des Molkekonzentrats via LKW. Eine attraktive Alternative zur derzeitigen Verwertung besteht in der Einbringung der Molke in die Biogasanlage der ARA-Sax. Das Einsparpotential für die LESA wäre dadurch beträchtlich.

Erhöhung des Gasertrags durch Co-Vergärung von protein- und fettreichen Stoffen [32]: Durch Zufuhr von protein- und fettreichen Stoffen als Co-Substrate in den Faulraum der ARA-Frick soll die Gasproduktion erhöht werden. Die chemisch-biologischen Prozesse der Fermentation sowie das Verhalten der zur Verwertung des Biogases eingesetzten Mikrogasturbine sollen dabei überwacht und ausgewertet werden. Im Berichtsjahr wurde das Messkonzept erstellt und die notwendige Infrastruktur in die ARA implementiert. Im Jahr 2004 können nun je eine Messperiode im Winter und im Sommer durchgeführt werden.

Solare Klärschlamm-trocknung ARA Bilten [33]: Das in Bilten eingesetzte Verfahren der solaren Klärschlamm-trocknung eignet sich für den Einsatz mit entwässertem Klärschlamm (TS-Gehalt 20 % und höher). Mehr als zwei Drittel des nach der Entwässerung noch im Klärschlamm enthaltenen Wassers kann damit verdunstet werden. Bei aktuellen Entsorgungskosten von CHF 200.- pro Tonne Klärschlamm können mit dem Verfahren jährlich CHF 300'000.- eingespart werden, womit sich die Anlage in gut fünf Jahren amortisiert.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Verbrennung: Nach den erfolgreichen Rückmeldungen der Vorphase des Projekts *System-optimierungen* werden nun weitere rund 25 Holzfeuerungen grösserer Leistung auf Qualität und Wirtschaftlichkeit untersucht. Für den VHP wurde ein neues Planungswerkzeug zur Dimensionierung für Speicheröfen geschaffen. Bei der Fachhochschule Beider Basel (FHBB) wurde im Rahmen des BRENET eine akkreditierte Prüfstation aufgebaut um kleinere Holzfeuerungen nach den vorhandenen EU-Normen zu Prüfen. Die Verbrennung

von Hofdünger ist gemäss Gewässerschutzgesetz nicht gestattet; es wurde entschieden, Projekte in diesem Bereich ruhen zu lassen. Offene Fragen bei den landwirtschaftlichen Feststoffen liegen bei den Folgen einer Verbrennung zusammen mit dem Basisbrennstoff Holz.

Vergasung: Die vorgesehenen Arbeiten konnten wegen finanziellen Problemen nicht wie vorgesehen realisiert werden. Die Rahmenbedingungen für diese Technologie haben sich weiter

verschlechtert, obschon sich das Marktpotenzial seit 1990 bis heute verfünffacht hat. Es wird nun versucht, verkaufsfähige Produkte zu entwickeln und Langzeiterfahrungen zu sammeln.

Vergärung: Das Interesse am Bau von landwirtschaftlichen Biogasanlagen hat im Berichtsjahr stark zugenommen. Trotz der Bereitschaft einiger Landwirte entsprechende Anlagen zu realisieren, blieben einzelne Projekte wegen offener Fragen bezüglich Interpretation der Raumplanungsgesetzgebung (Zonenkonformität bzw. Standortgebundenheit von Biogasanlagen in Landwirtschaftszonen) im Bewilligungsverfahren stecken. Aufgrund dieser Probleme wird die Thematik im Rahmen eines kleinen Projekts mit den zuständigen Stellen geklärt und entsprechende Vorschläge (1. interner Bericht, 2. ggf. Vollzugshilfe für Kantone) werden erarbeitet. 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 landwirtschaftliche Betriebe ist die Verstromung von Biogas die einfachste und ökonomisch interessanteste Variante.

Der im Vorjahr in Otelfingen eröffnete *Kompogas-Info-Park* erfreut sich grosser Beliebtheit. Zahlreiche Besucher aus Wirtschaft, Industrie, Verwaltung und aus der Bevölkerung konnten anhand des sehr anschaulich dargestellten Stoffkreislaufs und der Möglichkeiten zur Nutzung der gewonnenen Energie (Treibstoff, Strom und Wärme) für die Biomasseenergie begeistert werden.

Nachwachsende Ressourcen (NWR): Das Positionspapier des BUWAL über die energetische Nutzung von NWR 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. Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojekts mit dem BUWAL sollen die Ökoinventare der wichtigsten Prozessketten für die Bereitstellung von Energieprodukten aus Biomasse ermittelt und die entsprechenden Bewertungen miteinander verglichen werden. Im Berichtsjahr wurde die Vorstudie gestartet, der Start der Hauptstudie ist im Frühjahr 2004 geplant.

Die Erfahrungen mit dem Betrieb von Pilot- und Demonstrationsanlagen zeigen, dass in verschiedenen Bereichen die **Rahmenbedingungen** für die energetische Nutzung der Biomasse von zentraler Bedeutung sind. Folgende Punkte werden im Hinblick auf eine Zunahme der Biomassenutzung zurzeit diskutiert und entsprechende Lösungen zeichnen sich ab:

- Stromrücklieferung, CO₂-Gesetz, Klimarappen, Förderprogramme (vor allem auch kantonale)
- Befreiung biogener Treibstoffe von der Mineralölsteuer (die OZD erarbeitet die entsprechenden Entwürfe; das BFE ist in einer Begleitgruppe vertreten)
- Konflikte mit der Zonenkonformität für Biogasanlagen in der Landwirtschaft (ein Kleinprojekt zur Klärung der Fragen rund um die Interpretation der Raumplanungsgesetzgebung wurde in Zusammenarbeit mit den betroffenen Stellen gestartet)
- allgemeine Förderung von regenerativen Energiequellen: zurzeit sind zahlreiche parlamentarische Vorstösse hängig, die in Richtung Förderung von erneuerbaren Energien gehen (zusätzliche MWSt-Prozente, kostendeckende Rückliefertarife u.a.m.)

Die Verbesserung der Rahmenbedingung wird auch für 2004 ein Schwerpunkt des Bereichs *Biomasse* sein. Die Ämter übergreifende Diskussion zum Thema Biomasse soll weiterhin gefördert werden, um Kräfte zu bündeln und besser zu koordinieren. Im Zusammenhang mit der Diskussion um den Handel von Emissionszertifikaten kann auch das Thema Bewertung von CO₂-Senken (Wald, Boden) an Bedeutung zunehmen.

Eine Verschiebung von der Forschung hin zu einer vermehrten Realisierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen war auch im Jahr 2003 die allgemeine Stossrichtung. Zudem wurde versucht, die Industrie vermehrt in die Forschungs- und P+D-Projekte einzubinden. Der Forschungsbedarf bei der Biomasse liegt vor allem in der Optimierung von Verfahren und Systemen, angefangen von der Gewinnung des Einsatzmaterials (Feedstock), über die Aufbereitung und Umwandlung 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 in Zukunft nahezu 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, müssen unbedingte Alternativen gesucht werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2003 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

(*) Bericht nicht publiziert

ENET: Bestellnummer des Berichts unter www.energieforschung.ch bei ENET-Dokumentation

- [1] Th. Nussbaumer (verenum@access.ch), VERENUM, Zürich: **a) Systemoptimierung automatischer Holzfeuerungen (JB)** ♦ **b) Wirkung von Verbrennungspartikel (JB)** ♦ **c) IEA, Bioenergy Agreement Task 19 Biomass Combustion (JB)**.
- [2] R. Bühler (rbbuehler@mus.ch), Maschwanden: **IEA Task 33, Thermal Gasification of Biomass (JB)**.
- [3] Ch. Gaegauf (gaegauf@oekozentrum.ch), ÖKOZENTRUM, Langenbruck: **a) Auslegung und Optimierung von Holzspeicheröfen (SB)** ♦ **b) Wirksamkeit neuer Abscheidetechniken (SB)**.
- [4] Dr. Peter von Böckh (p.vonboeckh@fhbb.ch), FHBB, Muttenz und Ch. Gaegauf, ÖKOZENTRUM, Langenbruck: **akkreditierte Prüfstelle für Holzfeuerungen**.
- [5] H.R. Gabathuler (gabathuler.ag@bluewin.ch), Diessenhofen: **Regenkonzepte für bivalente Holzheizungsanlagen mit Speicher (SB)**.
- [6] Y. Membrez (erep@iprolink.ch), EREP, Aclens: **Energie à partir du petit-lait: comparaison des filières biogaz et bioéthanol (JB)**.
- [7] A. Wellinger (arthur.wellinger@novaenergie.ch), NOVA ENERGIE, Ettenhausen: **Vertretung der Schweiz im IEA Bioenergy Agreement, Task 37, Energy from Biogas and Landfill Gas (JB)**.
- [8] N. Jungbluth (jungbluth@esu-services.ch), ESU-services, Uster: **Vorstudie «Ökobilanz von Energieprodukten» (SB*)**.
- [9] E. A. Müller (mueller.eam@bluewin.ch), Felix Schmid, Beat Kobel, Martin Kernen, Energie in ARA, Büro eam, Zürich: **Klärgasverstromung: Zertifizierung und Vermarktungsmodell für Ökostrom an Fallbeispielen (SB)**.
- [10] E. Luye (enga.luye@belairbiotech.ch), BELAIR Biotechnologie, Lausanne: **Valorisation énergétique de matières organiques (VEMOT) - Avant-projet (JB)**.
- [11] Hersener/Meier (info@agrenum.ch), ARGE UF-Membran, c/o Ing'büro HERSENER, Wiesendangen: **Membranevaluation zur Vergärung von Gülle im Membranreaktor (UF-Membran) (SB)**.
- [12] O. Fischli (ofischli@active.ch), energieprojekte fischli, Näfels: **Messkampagne für eine solare Klärschlamm-trocknungsanlage in Bilten GL (SB)**.
- [13] O. Kohle (kohle@freesurf.ch), KohleNusbaumer, Lausanne: **Molke-Biogasanlage mit BHKW für die Molkerei Lateria Engadina (LESA) in Bever (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 Perkulationsanlage 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] M. Hofmann (m.hofmann@hswzfh.ch), Urs Baier, Hochschule Wädenswil (HSW): *Vergärung von Pulpa aus der Kaffee-Produktion* (SB).
- [19] U. Brückler (ub@itz.ch), R. Limacher, ARGE SwissFarmerPower, *Horw: Vorstudie „Biogas vom Bauer wird zum Treibstoff von morgen“* (JB).
- [20] Paul Schärer Institut, *Villigen: a) Methan aus Holz* (JB) ♦ *b) Biogenes Methan durch hydrothermale Vergasung* (JB).

Liste der P+D-Projekte

- [21] L. Bertozzi (bertozzi@raytec.com), H. Baumgartner, *Schwanden: Abgaskondensation am Wärmeverbund in Schwanden* (JB).
- [22] P. Giordano, Xylowatt, *Châtel-St-Denis: Holzvergasungsanlage der Xylowatt SA* (SB).
- [23] B. Meyer (welcome@pyroforce.ch) et al., Pyroforce, *Emmenbrücke: Optimierung eines Gleichstromvergasers im industriellen Massstab für die Vergasung von feuchten Holzschnitzeln und Altholz und Entwicklung der trockenen Gasreinigung* (SB).
- [24] Urs Baier (u.baier@hsw.ch), Pascal Delavy, HSW Hochschule Wädenswil: *Bioenergie, Protein und Fasern aus Gras – Monitoring des Biogasprozesses* (SB) ENET Nr. 230052.
- [25] F. Büchler, M. Gabriel (f.buechler@kuenzlerpartner.ch), Künzler + Partner AG, *Luzern: Lupu AG - Biogasverwertung mit BHKW* (SB).
- [26] Bruno Liesch (bruno.liesch@ines-energy.ch), INES Ingenieurbüro, *Bern: Kompakt-Biogasanlage für die Landwirtschaft mit effizienter BHKW-Technik* (JB).
- [27] R. Bettex (info@fromagerie-bettex.ch), *Champtauroz: Installation de production de biogaz* (JB).
- [28] D. Ruch (ruch@genesys-gmbh.ch), GENESYS GMBH, *Frauenfeld: Kompakt-Biogasanlage Ott, Kanton Schwyz - Zusammenfassung und Betriebsauswertung der Anlage* (JB).
- [29] T. Weisskopf (thomas.weisskopf@weisskopf-partner.ch), C. Eugster, R. Colombi, J. Chaloupka, Weisskopf Partner Gmbh, *Zürich: Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle Co- Vergärungsanlage E. Flachsmann AG* (SB) ENET Nr. 230204.
- [30] D. Ruch (ruch@genesys-gmbh.ch), GENESYS GMBH, *Frauenfeld: BHKW-Optimierung und SCR-Katalysator Kompaktbiogasanlage Küsnacht* (JB).
- [31] O. Wartmann (wartmann@active.ch), H. Engeli, engeli engineering, *Neerach: Biogasverwertung aus der Lagergrube, Anlage Wartmann Bissegg* (JB).
- [32] B. Näf (beat.naef@verdesis.com), Verdesis Suisse S.A., *Erlinsbach: Erhöhung des Gasertrags durch Co-Vergärung von protein- und fettreichen Stoffen* (JB).
- [33] O. Fischli (energieprojekte@fischli.cc), energieprojekte fischli, *Näfels: Solare Klärschlamm-trocknung ARA Bilten* (-).

Referenzen

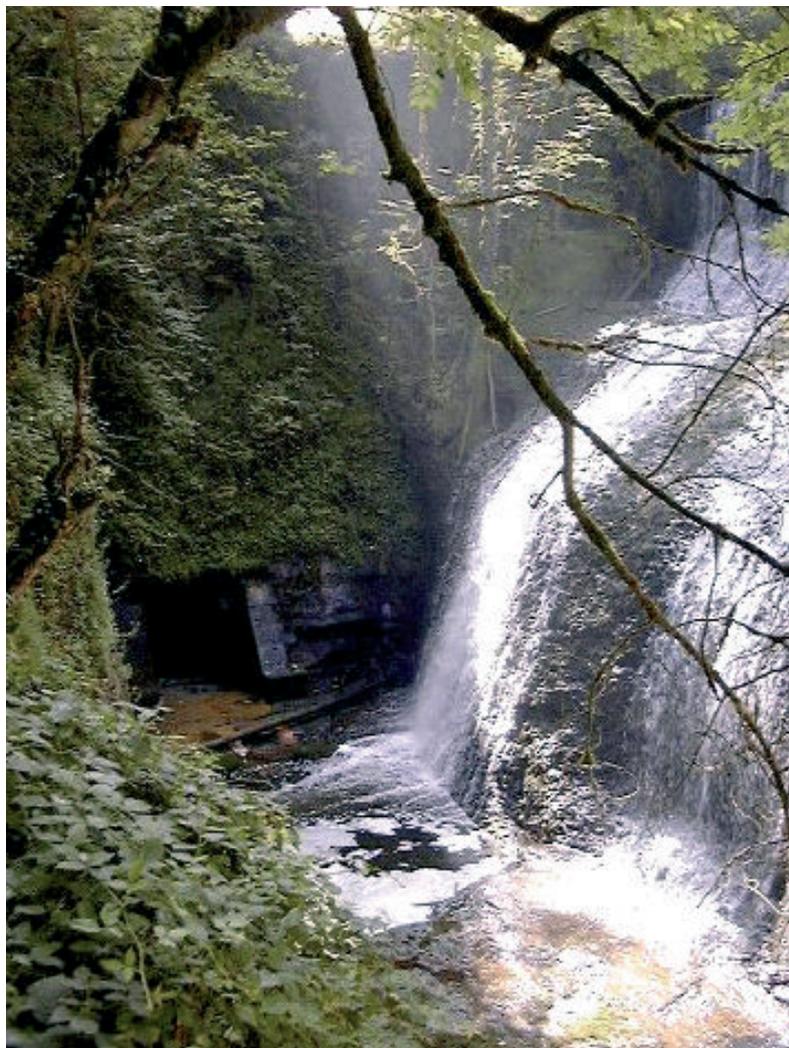
- [34] *Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007*, ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, www.energie-schweiz.ch, Rubrik Forschung; Konzepte.

KLEINWASSERKRAFTWERKE

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Bruno Guggisberg

bruno.guggisberg@bfe.admin.ch



Kleinwasserkraftanlage Buchholz

Pilotanlage mit Integration von Wasserkraft und Naturschutz; zur Überwindung der 15 m hohen Staumauer ist eine Fischschleuse eingebaut.

Programmschwerpunkte und avisierte Ziele

Bisher verstand sich das Netzwerk *Kleinwasserkraftwerke* als vollständige Branchenvertretung und Drehscheibe. Die Strategie war, möglichst allen sich ernsthaft engagierenden Personen weiterzuhelfen und sie zu ermutigen, sinnvolle Projekte zu realisieren. Die sich zunehmend verschärfende Budgetsituation im Bereich *Kleinwasserkraftwerke* hat zur Folge, dass die Aktivitäten in allen Bereichen (F+E, P+D und Markt) noch stärker konzentriert werden müssen. Erschwerend kommt hinzu, dass ab 2004 die Mittel für P+D voraussichtlich ganz ausbleiben werden.

Schwerpunkte gemäss BFE-Konzept Kleinwasserkraftwerke 2003:

- Reaktivierungen stillgelegter Anlagen
- Verhindern von Stilllegungen
- Realisierung von Trinkwasserkraftwerken

Die **Ziele** für das Jahr 2003 lauteten wie folgt:

- **Pilot- und Demonstrationsanlagen**
Konsolidierung und Abschluss laufender Projekte; Auslösen von neuen Projekten entsprechend der obigen Zielsetzung; Projekte aus der angewandten Forschung
- **Indirekte Massnahmen: Projektierungsarbeiten**
Erhöhung der Realisierungschancen durch Beiträge an Grobanalysen und Vorstudien.

Neue Strategie gemäss Positionspapier Energie aus Kleinwasserkraftwerken

Im Berichtsjahr wurde das Programm *Kleinwasserkraftwerke* neu strukturiert und ausgerichtet. Die **Forschung** soll in Übereinstimmung mit dem *Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007* [26] technische Lösungen und Konzepte sowie Standardisierte Systeme erarbeiten, die zu einer **Kostensenkung** von Kleinwasserkraftwerken (bei Planung, Bau und Betrieb) führen. Eine **optimale Integration** von Anlagen in die Umwelt sowie das Identifizieren von **Synergien** mit anderen Systemen (z.B. gemeinsame Konzepte zur Nutzung der Triebwasser- und Umgebungswärme, Wärmepumpen usw.) und Bereichen (z.B. gemeinsame Konzepte mit Hochwasserschutz, Landschaftsschutz (Biotope) etc.) sind weitere Schwerpunkte des Programms.

Bei der **Umsetzung** gehören die **Realisierung** von Trinkwasserkraftwerken, das **Reaktivieren** stillgelegter Anlagen sowie das **Verhindern von Stilllegungen** zu den wichtigsten Zielen im Bereich Kleinwasserkraftwerke. Anhand von Pilot- und Demonstrationsanlagen soll – sofern dazu Mittel vorhanden sind – gezeigt werden, dass ein Vorhaben sowohl aus energetischer, als auch aus ökologischer und ökonomischer Sicht Sinn macht.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

Die Arbeiten konnten gemäss BFE-Konzept Kleinwasserkraftwerke 2003 durchgeführt werden. Im Berichtsjahr wurden Beiträge an 25 neue Vorstudienprojekte (inkl. Grobanalysen) verfügt [8 bis 22]. Deren kumulierte **Leistung (nur Vorstudien) von über 1.5 MW** zeigt ein beträchtliches Potenzial auf. Wird erfahrungsgemäss [23] gut die Hälfte davon realisiert, ergibt dies einen **Zuwachs von gut 4 GWh** Jahresenergie. Bei 17 der 22 durchgeführten Grobanalysen konnte die Machbarkeit mit Gestehungskosten von unter 15 Rp./kWh aufgezeigt werden.

Die Beiträge an Planungsarbeiten bilden einen effizienten Teil des Programms *Kleinwasserkraftwerke*. Sie umfassen die Vorstudienphase und bei

kleineren Projekten auch das Bewilligungsprojekt. Ein guter Teil des Erfolges liegt vermutlich in der Niederschwelligkeit des Angebotes: Die Gesuche werden nur nach Formfragen geprüft, und die Beitrag nach einem fixen Tarif zugesprochen. Dieses Modell funktioniert nur solange die Gesuche wie bisher innerhalb des Budgetrahmens bleiben.

Als Sonderkreditprojekt 2003 wurde das Projekt ***Kleinwasserkraftanlage Buchholz*** [22] ausgewählt (s. Titelbild Programmbericht). Es zeigt exemplarisch auf, wie die Integration von Wasserkraft und Naturschutz aussehen könnte. Zudem kommt erstmals eine Fischschleuse als Aufstiegshilfe zum Einsatz.

Nationale Zusammenarbeit

Das Programm Kleinwasserkraftwerke bildet zusammen mit dem *Interessenverband Schweizerischer Kleinkraftwerk-Besitzer (ISKB)* und dessen Westschweizer Sektion *Association des Usiniers Romands (ADUR)* den Kern des Netzwerks Kleinwasserkraftwerke [25]. Im Verband sind Besitzer und Betreiber sowie die spezialisierte Anbieterbranche und interessierte Institutionen vertreten. Das Programm ist in den drei Sprachregionen vertreten. Fallweise wird mit Branchenverbänden der Elektrizitätswirtschaft und des Umweltschutzes zusammengearbeitet. Die Koordination mit den

anderen Netzwerken geschieht hauptsächlich über die *Agentur für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz (AEE)*.

Die Information und Beratung mit **drei sprach-regionalen Infostellen** wurde weitergeführt. Wie jedes Jahr wurde eine zweisprachige **Fachtagung** durchgeführt, diesmal zum Thema *Technische Innovationen bei Kleinwasserkraftwerken mit einem Workshop über gefährdete Altrechte (ehemalige Rechte)*.

Internationale Zusammenarbeit

Der *ISKB* arbeitet kontinuierlich mit den Bruderverbänden in Nachbarländern, mit der *Europäischen Kleinkraftwerksvereinigung (ESHA)* und mit Tagungsveranstaltern im Ausland zusammen. Technisch und kommerziell ist der europäische Ausrüstermarkt massgebend, wohingegen der

Schweizer Anbietermarkt stark geschrumpft ist. Bei den Infostellen regelmässig eingehende Anfragen aus dem Ausland können aus finanziellen Gründen je länger desto weniger beantwortet werden.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Demonstrationsprojekt Wasserkraftschnecke in Derendingen [1]: Am Grützbach in Derendingen wird ein Kleinwasserkraftwerk erstellt welches als erstes in der Schweiz eine Wasserkraftschnecke als Kraftmaschine verwendet. Das Ziel, die Wasserkraftschnecke nach deren Montage im Januar 2003 in Betrieb zu nehmen, konnte aus verschiedenen Gründen nicht eingehalten werden.

Erreicht werden konnte aber die Konstruktion aller wichtigen Komponenten wie Abdichtung, Einlaufklappe, Rechen, Lärmschutzhaube und provisorische Umgehungsclappe. Die meisten dieser Teile befinden sich in der Fertigung oder sind bereits montagebereit. Einige wichtige Zwischenarbeiten wie Netzanschluss, Einstau des Wassers, die Inbetriebnahme der Fischtreppe sowie die Erstellung der Erschließungsbrücken und Witterungsschutze konnten fertiggestellt werden oder sind kurz vor der Vollendung. Im Jahr 2004 stehen nun das Fertigstellen der oben angeführten Punkte sowie die Inbetriebnahme an.

Micro-centrale de Verbois [2]: La construction de la micro-centrale de Verbois a pour but d'utiliser le débit d'eau (env. 2 m³/s) nécessaire au

courant d'attrait de la passe à poissons qui sans cette utilisation serait perdu pour la production d'électricité de la centrale de Verbois. Le délai de mise en production a été tenu, la micro-centrale a débuté la production le 5 novembre 2003. La production de la micro-centrale à ce jour a été de 278kWh en moyenne. Avec une chute d'eau optimale on a obtenu une production de 330kWh.

Neu gestartete Projekte (teilweise mit Forschungscharakter)

Charakteristiken von Pumpen im Turbinenbetrieb [3]: Standardpumpen im Turbinenbetrieb eigenen sich aus wirtschaftlichen Gründen vor allem für den Einsatz bei kleinen Leistungen in Trinkwassersystemen. Im Rahmen dieses Projekts sollen die Arbeiten eines vom BFE früher unterstützten Forschungsprojekts der Fachhochschule Sion (Bericht kann bei ENET unter Nr. 194143 bezogen werden) weitergeführt werden. Diese viel versprechende Nutzungsart soll der industriellen Umsetzung näher gebracht werden.

Trinkwasserkraftwerk Mettental [4]: Im Rahmen dieses Projekts soll ein Ultra-Hochdruck-Trinkwasserkraftwerk realisiert werden, welches

das Trinkwasser einstufig über eine Fallhöhe von 921m turbinieren. Mit einer Ausbauleistung von 218 kW wird eine Jahres-Energieproduktion von rund 830'000 kWh erwartet.

Das Projekt stellt hinsichtlich Nutzung der gesamten Fallhöhe in einer Stufe eines Kleinwasserkraftwerks ein Novum dar. Die technische Herausforderung liegt aber vor allem im extrem dünnen Düsenstrahl bei Teillast, welcher das Synchronisieren erschweren und den Wirkungsgrad verschlechtern kann. Eine einstufige Lösung solcher Kleinwasserkraftwerke hat auf dem Markt gute Chancen, da die Wirtschaftlichkeit infolge Einsparungen bei den Erschliessungskosten erhöht wird.

Zweiteiliger Synchrongenerator mit Permanentmagneten [5]: Im Rahmen dieses Projekts soll ein zweiteiliger Synchrongenerator mit Permanentmagneten für den Direktanbau an die Turbinenwelle entwickelt werden. Ziele sind die Steigerung des Gesamtwirkungsgrades, die Reduktion der Unterhaltskosten sowie das Schonen historisch wertvoller Anlageteile. Die Marktchancen dieses Systems sind auf jene kleine Nischen beschränkt, wo wesentlich kostengünstigere Standardlösungen nicht ohne weiteres möglich sind.

Kleinwasserkraftwerke für variable Volumenströme in geschlossenen Systemen [6]: Es soll eine kostengünstige Anlage zur Nutzung der Druckreduzierenergie in geschlossenen Systemen (z.B. Trinkwasserversorgungen) entwickelt werden. Das Anwendungspotenzial ist beträchtlich und die Gesamtökobilanz von solchen Systemen hervorragend. Es sind im Weiteren Erkenntnisse zu erwarten, die für andere Bereiche wichtig sind (z.B. Druckstossverhalten der Turbinen).

Aus dem Sonderkredit 2003 wurde das Demonstrationsprojekt **Kleinwasserkraftwerk Buchholz** [7], Eberleweiher (siehe Titelbild des Programmberichts) unterstützt. Die Wasserkraft der Glatt am Eberleweiher auf der Gemeindegrenze Gosau / Flawil (SG) soll nach über 90 Jahren reaktiviert werden. Dabei soll die Verbindung der Glatt durch den Bau einer neuartigen Fischaufstiegshilfe (Fischschleuse) über die 15m hohe Staumauer erreicht werden. Die Ziele des Jahres 2003 wurden mit der Detailprojektierung (unter Beizug von Experten für Fischereibiologie und Stauanlagen) sowie mit der Auftragsvergabe für die Lieferung der Hauptkomponenten der Anlage grösstenteils erreicht. Verzögerungen mussten durch die Uneinigkeit bezüglich Abnahmepflicht der drei am Standort operierenden öffentlichen Stromversorger in Kauf genommen werden. Die Realisierung ist für 2004 geplant.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

PILOT- UND DEMONSTRATIONSPROJEKTE

Der Wechsel der Programmleitung *Kleinwasserkraftwerke* Anfang September 2003 machte gewisse Aufräumarbeiten nötig. Die Neuorganisation des Bereichs *Kleinwasserkraftwerke* tritt ab Anfang 2004 in Kraft.

Ein seit längerem vorhandenes Problem ist die weiter schwindende Fabrikantenbranche in der Wasserkraftindustrie. Verstärkt durch die schwierige Wirtschaftslage und gewissen Unsicherheiten in der Energiepolitik (kostendeckende Einspeiseregulierung, ELWO etc.) wird es weiterhin schwierig sein, grössere industrielle P+D-Projekte zu realisieren. Hinzu kommt ab 2004 die voraussichtlich komplette Streichung der P+D-Budgets im Programm *Kleinwasserkraftwerke*.

PLANUNGSARBEITEN

Die Erfahrung zeigt, dass mit Beiträgen an Planungsarbeiten und Vorabklärungen die Bundesmittel sehr effizient und effektiv eingesetzt sind.

Die verhältnismässig kleinen Beiträge tragen massgeblich dazu bei, dass interessierte Bauherren das Potenzial eines Projekts auch genau abklären lassen. Die Bundesbeiträge haben gemäss einer Studie [23] positive Wirkungen auf die Qualität der Arbeiten und erhöhen bei positiver Bewertung des Vorhabens (auch aus ökonomischer Sicht) die Realisierungschancen markant.

Besonders hervorzuheben ist ein grösseres Projekt [22], das die energetische Nutzung von Tunnelwasser (Karst- und Bergwasser) sowie eines ARA-Ablaufs vorsieht. Ziele der ersten Projekt-Stufe sind die Fassung und Nutzung der durch den Tunnelbau angefahrenen Karstquelle Val Davos, Tunnel Flimserstein. Die Ziele der Stufe 2 liegen bei der Nutzung der durch den Tunnelbau erschlossenen Karst- und Bergwasser, der Zuleitung und Nutzung des ARA-Ablaufs zur Verbesserung der Verhältnisse im Vorfluter und bei der Nutzung der Winterabflüsse des Flembachs ab der geplanten Wasserfassung bei der ARA.

Liste der P+D-Projekte

(JB) Jahresbericht 2003 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

- [1] Thomas Köhli, thomaskoehli@yahoo.com, *Derendingen* : **Demonstrationskraftwerk alte Ziegelei am Grütbach, Derendingen** (JB).
- [2] Jean Louis Martinez, jean-louis.martinez@sig-ge.ch, SIG/SE/ICM/ETU, *Genève*: **Micro-centrale de Verbois** (JB).
- [3] Michel Dubas, michel.dubas@hevs.ch, Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale (HES SO), *Sion*: **Charakteristiken von Pumpen im Turbinenbetrieb** (-).
- [4] Alois Spichtig, alois.spichtig@bluemail.ch, Wasserversorgung *Sachseln* Dorf und Umkreis (WVS): **Trinkwasserkraftwerk Mettental** (-).
- [5] Bruno Schindelholz, bruno.schindelholz@revita.ch, Stiftung Revita, *Langenbruck*: **Zweiteiliger Synchrongenerator mit Permanentmagneten** (-).
- [6] Bruno Schindelholz, bruno.schindelholz@revita.ch, Stiftung Revita, *Langenbruck*: **Kleinstwasserkraftwerke für variable Volumenströme in geschlossenen Systemen** (-).
- [7] Peter Eichenberger, peter.eichenberger@entec.ch, ENTEGRA Wasserkraft AG, *St. Gallen*: **Kleinwasserkraftanlage Buchholz** (JB - Sonderkreditprojekt 2003).

Vorstudien (2003)

(Werte in Klammer: Installierte elektrische Leistung, Brutto-Nutzgefälle, mittlere jährliche Produktionsleistung, Energiegestehungskosten)

- [8] Norbert Tissot, tissotn@mhyllab.com, MHyLab, *Montcherand*: **Etude de faisabilité; Petite centrale hydro-électrique au lieu dit «Sous les Roches» à Sonceboz** (SB) ENET 230055 (170 - 230 kW*, 10.1 m, 1'600 - 1'800 MWh*, 12.5 - 14 Rp./kWh*; *je nach Variante).
- [9] Joseph Burri und Fernando Binder, josef.burri@im-maggia.ch, Ing.-büro *Maggia*: **Vorstudie Kraftwerk Trempel - Erneuerung und Erweiterung der bestehenden Anlage** (SB) ENET 230185 (1500 kW, 23 m, 6.9 GWh, 11 Rp./kWh).
- [10] Markus Hintermann und Paul Dietschi, info@hydrosolar.ch, HYDRO-SOLAR Energie AG, *Niederdorf*: **Kleinwasserkraftwerk Steinerkanal Alte Spinnerei, Rapperswil** (SB) ENET 230078 (15 kW, 2.75 m, 100'000 kWh, 19 Rp./kWh).
- [11] Adrian Bretscher, adrian.bretscher@revita.ch, Stiftung Revita, *Langenbruck*: **Kleinwasserkraftwerk Hägler-Mühle Lausen** (SB 2002) ENET 220170 (62 kW, 11 m, 250'000 kWh, 22 Rp./kWh).
- [12] Roland Schmid und Fernando Bonato, roland.schmid@epspower.ch, EPS / Eco Power Systems AG, *Zug*: **Kleinwasserkraftwerk Hegi / Grüntal in Aadorf TG** (SB) ENET 230205 (14 kW, 4.1 m, 70'000 kWh, 15 - 18.9 Rp./kWh).
- [13] Vincent Denis, denisv@mhyllab.com, MHyLab, *Montcherand*: **Petite usine hydroélectrique de La Poissine, Twann** (SB 2002) ENET 220342 (7.6 kW, 3.5 m, 56'700 kWh, 20 - 33 Rp./kWh).
- [14] Marc Werdmüller, markwerdmuller@yahoo.com, *Concise*: **Petite Centrale de La Raisse, Concise** (SB) (60 kW / 10 kW*, 11 m / 4.2 m*, 310'250 kWh / 65'700 kWh, 16 Rp./kWh; *grosse / kleine Zentrale).

- [15] Bernhard Kunz und Hanspeter Meng, k-m.gmbh@bluewin.ch, Kunz&Meng GmbH, *Langnau: Kraftwerk Schöni Hani, Gwatt bei Thun* (SB) ENET 230031 (52.5 kW, 17.5 m, 181'900 kWh, 16 Rp./kWh).
- [16] Adrian Bretscher, adrian.bretscher@revita.ch, Stiftung Revita, *Langenbruck: Kleinwasserkraftwerk St. Albanteich, Basel* (SB) (120 kW, 7.9 m, 980'000 kWh, 16.2 Rp./kWh).
- [17] Adrian Bretscher, adrian.bretscher@revita.ch, Stiftung Revita, *Langenbruck: Kleinwasserkraftwerk WERAP Immobilien AG, Bubikon ZH* (SB) ENET 230081 (50 kW, 13 m, 190'000 - 200'000 kWh, 17.6 - 20 Rp./kWh).
- [18] Adrian Bretscher, adrian.bretscher@revita.ch, Stiftung Revita, *Langenbruck: Kleinstwasserkraftwerk Lochmühle, Welschenrohr* (SB) ENET 230080 (8 kW, 5.6 m, 27'000 kWh, 18.5 Rp./kWh).
- [19] Liesch Ingenieure AG, mail@liesch.ch, *Chur: Kleinwasserkraftwerk Mühlbach, Malans - Ausbau Stufe III* (SB) ENET 230208 (39 kW, 4.9 m, 300'000 kWh, 13 Rp./kWh).
- [20] Adrian Bretscher, adrian.bretscher@revita.ch, Stiftung Revita, *Langenbruck: Kleinwasserkraftwerk J. Dürsteler & Co AG, Schöntal, Wetzikon ZH* (SB) ENET pendent (43 kW, 2.46 m, 93'344 kWh, 14.5 Rp./kWh).
- [21] René Marugg, info@maruggbruni.ch, Marugg + Bruni AG, *Chur: Energienutzung Wasser-versorgung Chur* (SB) ENET pendent (verschiedene Stufen).
- [22] Martin Maron, mmaron@flimselectric.ch, Flims Electric AG, *Chur: Nutzung Tunnelwasser Flimserstein Stufe 1 und 2* (-) (Stufe1: 425 kW, 110 m, 1'884'000 kWh, 6.21 Rp./kWh; Stufe 2: 700 kW, 105 m, 4'008'000 kWh, 5.65 Rp./kWh).

Referenzen

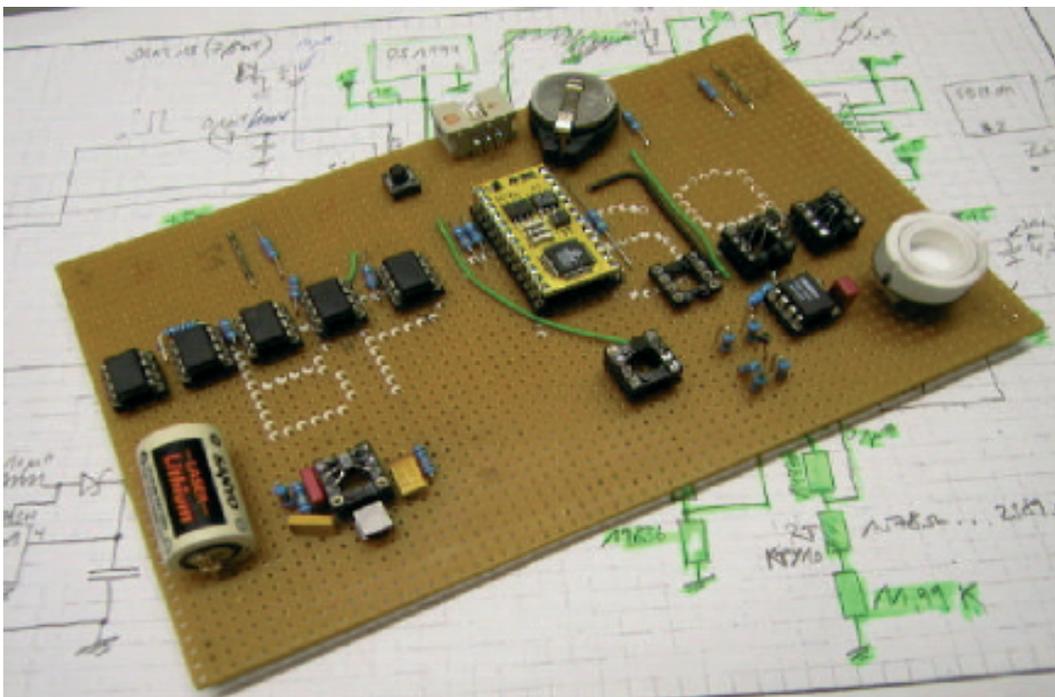
- [23] J. Kuster und Ph. Suter, j.kuster@hanserconsulting.ch, BHP Hanser & P., *Zürich: Bundesbeiträge an Vorstudien für Kleinwasserkraftwerke; Realisierungsstand der Vorstudienprojekte 1993 bis 2001, Kurzevaluation der Wirkung der Bundesbeiträge (1996)* (SB) ENET 220140
- [24] Stefan Rieder u.a, Interface Politikstudien, *Luzern: Evaluation Netzwerk Kleinwasserkraftwerke* (SB)
- [25] *Internetsite des Programms Kleinwasserkraftwerke* www.smallhydro.ch
- [26] *Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007*, Download unter: <http://www.energie-schweiz.ch/internet/03095/index.html?lang=de>

GEOHERMIE

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Harald L. Gorhan

harald.gorhan@bluewin.ch



Drahtloser Minidatenlogger für Druck- und Temperaturmessungen in Erdwärmesonden:

Sowohl das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten als auch die Betriebssicherheit einer neuentwickelten Software wird an einem Prototyp getestet

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Forschungsschwerpunkte des Programms *Geothermie* sind:

Weiterentwicklung und Realisierung des ersten Hot-Dry-Rock / Hot-Wet-Rock-Projektes zur Strom- und Wärmeproduktion in der Schweiz im **Deep-Heat-Mining-Projekt** (DHM-Projekt). Die im Werkhof Kleinhüningen der Industriellen Werke Basel (IWB) geplante Anlage soll Vorbild für ähnliche Nachfolgeprojekte sein (z.B. Genf, Locarno). Es ist geplant, 2008 mit der umweltfreundlichen, CO₂-freien Wärme- und Stromproduktion zu beginnen (installierte Leistung: 20 MW_{th} und 3 MW_{el}). Die internationale Einbindung ist durch die intensive Zusammenarbeit mit der IEA bzw. durch die Mitarbeit von Schweizer Fachleuten am EU-Geothermieprojekt in Soultz-sous-forêts gegeben [4]. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass dieses EU-Projekt eine nennenswerte Mitfinanzierung am Schweizer DHM-Projekt in Basel liefert.

AlpTransit, Wärmenutzung von warmen Tunnelwässern: detaillierte Machbarkeitsstudien am Lötschberg Nord- und Süd-Portal bzw. am Gotthard Süd-Portal konnten, neben eigentlichen Wärmeversorgungen von Wohnquartieren, mehrere technisch-wirtschaftliche Wärmenutzungen von Tunnelwässern nachweisen, wie zum Beispiel die Erstellung von Tropenhäusern (ähnlich wie in Ruswil, LU) sowie von Hallen- und Wellnessbädern. In Frutigen (Lötschberg Nord-Portal) konnten bereits Investoren für ein derartiges Tropenhaus gefunden werden.

Bezüglich Forschung **untiefer Geothermie** stehen Untersuchungen zur Qualitätssicherung von

Erdwärmesondenfeldern und Energiepfahlanlagen mittels geothermischer Response-Tests bzw. der Neuentwicklung eines drahtlosen Minidatenloggers im Mittelpunkt (siehe Titelblatt).

Kurzfristige Ziele des Programms bei **Pilot- und Demonstrationsanlagen** sind:

- In allen Regionen der Schweiz stehen wirtschaftlich und energetisch vorbildliche geothermische Grossanlagen in Betrieb; dabei wird besonderes Gewicht auf eine kombinierte Heiz- und Kälteproduktion gelegt;
- An jedem der vier AlpTransit-Portale ist mindestens ein Projekt zur Nutzung des Tunnelwassers baureif;
- Die Qualitätssicherungsinstrumente im Bereich Geothermie sind entwickelt, überprüft und eingeführt.

Wichtige Randbedingungen sind:

- Verstärkung der Zusammenarbeit mit dem Bereich Gebäudetechnik (Wärmenutzung von erdberührenden Betonteilen, Energiepfählen und Erdwärmesondenfeldern in Zusammenhang mit thermoaktiven Betonstrukturen);
- Aufbau und Einführung einer breit abgestützten Qualitätskontrolle für die Auslegung von komplexen Anlagen zur Nutzung der Erdwärme und- kälte;
- Generelle Förderung von innovativen Konzepten der Erdwärmennutzung (z.B. Glashäuser zur Nutzung von warmen Tunnelwässern). Zu diesem Zweck enge Zusammenarbeit mit Spezialisten aus der Landwirtschaft und Aquakultur.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

DEEP HEAT MINING

Entwicklung der Hot-Dry-Rock / Hot-Wet-Rock Technologie in der Schweiz; 2003 [1]: Basel Stadt, die Elektra Baselland und der Gasverbund Mittelland haben namhafte Beteiligungen zur Realisierung dieses Projektes zugesichert. Damit sollte die Finanzierung des Gesamtprojektes zur Hälfte und die Realisierung der geplanten Tiefbohrung am Standort Kleinhüningen praktisch vollständig gesichert sein. Des Weiteren wurde ein Instrumentenkabel mit Mehrfachkomponenten-Geophonen in die im letzten Jahr erstellte Horch- und Testbohrung Otterbach 2,

eingehängt. Es sollen damit sowohl natürliche seismische als auch mikroseismische Ereignisse im zu erschliessenden, unterirdischen Reservoir aufgezeichnet werden. All diese Arbeiten und die anschliessende Datenauswertung erfolgen in enger Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Erdbebendienst (SED).

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 conclusions principales des travaux à ce jour peuvent être résumées comme suit : la capacité du réseau CAD

Genève est suffisante pour absorber l'énergie thermique produite par un système de géothermie de grande profondeur. Sous les conditions de base du projet GGP, la température de départ du réseau de 120 °C permettra de produire de l'électricité et simultanément de la chaleur. La capacité attendue du projet GGP, permettrait de substituer une quantité annuelle d'env. 120 GWh de chaleur produite, aujourd'hui, par du gaz naturel. En conséquence, env. 24'000 tonnes de CO₂ par an pourraient être éliminées. Pour une exploitation plus intensive qui dépasse le projet initial de trois forages, il faudrait élargir le réseau CAD et/ou connecter de nouveaux consommateurs de chaleur. Il serait particulièrement intéressant de trouver des consommateurs d'été, par exemple des centrales de climatisation par des machines à absorption. Naturellement, doivent les données principales de la source géothermique – débit et température de l'eau et stabilité de la source – être connues avant la sélection finale du système énergétique.

ERDWÄRMESONDEN UND ENERGIEPFÄHLE, QUALITÄTSKONTROLLE

Arteserkarte der Schweiz – Teilgebiet Basel – Luzern [5]: Eine Arteserkarte der Schweiz soll aufzeigen, wo das Auftreten von artesisch gespanntem Grundwasser nach vorliegenden Kenntnissen unwahrscheinlich ist. Damit können diverse Risiken bzw. Mehrkosten bei der Installation von Erdwärmesonden minimiert und somit das Entstehen von Schäden stark reduziert werden. Ausserdem soll ein Leitfaden über den fachgerechten Umgang mit Artesern erarbeitet werden. Der Abschluss der Arbeiten ist für Ende April 2004 vorgesehen (Projektverzögerung aufgrund von Verspätungen bei der Fertigstellung der GEO500-Karten durch das Bundesamt für Wasser und Geologie).

COOLTEL'REP: étude préliminaire du potentiel de rafraîchissement géothermique pour les relais de téléphonie mobile [6]: Installés par milliers à travers le pays, les relais de téléphonie mobile possèdent une forte densité électronique, pouvant rendre nécessaire un rafraîchissement actif de la cabine qui les abrite. Conçu comme une étude préliminaire, ce projet vise à délimiter le potentiel de rafraîchissement géothermique pour ces relais de téléphonie mobile, principalement le réseau UMTS, qui est supposé remplacer le réseau GSM actuel. Néanmoins, l'enjeu énergétique de la climatisation des cabines UMTS est modeste et ne justifie pas d'entreprendre une étude approfondie accompagnée d'essais in situ, de mesures et de simulations. En revanche, les auteurs du rapport et le groupe d'accompagnement proposent que

l'on s'approche d'une compagnie téléphonique pour réaliser un ou deux pilotes qui pourraient être instrumentés sommairement.

Optimierung von Sondenisolationen im obersten Abschnitt von Erdwärmesonden [7]:

In einer ersten Phase sollen die bisher gemachten Erfahrungen mit Sondenisolationen von bereits realisierten Projekten in Otelfingen, Aarau, Fislisbach und Seengen zusammengefasst und kritisch auf deren Kosten-Nutzen-Verhältnis geprüft werden. Der Abschluss der Arbeiten ist für Ende März 2004 vorgesehen.

Drahtloser Minidatenlogger für kontinuierliche Temperaturmessungen in Erdwärmesonden bis 350 m Tiefe [8]:

Es wurde ein drahtloser Minidatenlogger (Bohrlochsonde) entwickelt, gebaut, getestet, kalibriert und im Feldeinsatz unter realistischen Bedingungen erprobt. Die Sonde dient zur kabellosen Aufnahme von Temperaturprofilen in fertig erstellten, aber noch nicht in Betrieb genommenen Erdwärmesonden (EWS)-Bohrungen. Diese Sonde sinkt durch das abgegliche Eigengewicht zum Sondenfuss und misst dabei Druck und Temperatur. Das Temperaturlogging mit dem drahtlosen Minidatenlogger weist gegenüber einer kabelgebundenen Bohrlochmessung wesentliche Vorteile auf. Eine Patentanmeldung ist noch hängig. Mit der einwandfrei funktionierenden Sonde kann nun eine ganze Palette von anspruchsvollen Aufgaben angegangen werden.

Automatisation et télétransmission des données pour les tests de réponse [9]:

Dans le cadre de ce mandat, le module 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 télécommunications, il est apparu qu'il serait très profitable de rendre cet appareil plus performant. Les mesures effectuées sur place peuvent dès lors être disponible 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 premier test de réponse avec la nouvelle configuration va être réalisé à Lyon début 2004.

Geothermische Ressourcen. Erarbeitung und Bewirtschaftung des geothermischen Potentials der Schweiz [10]:

In enger Zusammenarbeit mit der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission (SGPK) wird in diesem Projekt eine detaillierte geologisch/geothermische Erfassung und Bewertung der Untergrundstruktur des Schweizerischen Mittellandes vorgenommen.

- **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 wurden mehrtägige Wanderausstellungen zur Geothermie in Lausanne, Genf und Fribourg durchgeführt (Figur 2).



Figur 2: Pont de la Machine, Genève: Exposition „Géothermie, douce énergie“ (été 2003)

Internationale Zusammenarbeit

Teilnahme am European geothermal project for the construction of a scientific pilot plant based on Enhanced Geothermal Systems [4]:

The present phase of the integrated European geothermal project at Soultz-sous-Forêts (Alsace, France), which is managed by an industrial consortium, has demonstrated that an *Enhanced Geothermal System (EGS)* based on three 5'000 m deep wells and using improved drilling, stimulation and diagnostic methods can be used successfully to access the geothermal energy at depth. The pilot plant will be used to test the in-situ performance of the selected equipment in order to establish preferences for technical and economical gains for future industrial EGS installations (25 MW el. and larger). After successful operation, the pilot plant itself will be made available as a training facility to other European EGS teams.

Teilnahme am **Geothermal Implementing Agreement (GIA) der IEA** [3]: The activities of the ExCo Vice-Chairman Prof. Dr. L. Rybach can be summarized as follows: contributions to the GIA 2003 Annual Report and to the revision of

the GIA Strategic Plan and work on special items such as the new GIA participation countries. A first distributable version of the *Project Management Decisional Assistant PDMA* has been compiled as a classifier. It contains more than 80 pages, divided into 5 main registers, and an attached CD with 6 data collections. This classifier will be the template – after a brief review in January 2004 – for the copies to be disseminated in 2004.

Im Ausland wurden von Herrn Prof. L. Rybach Vorträge zu folgenden Themen gehalten:

- **Geothermal energy: sustainability and the environment**
- **Sustainable use of geothermal resources: renewability aspects**
- **Regulatory framework for geothermal energy in Europe – with special reference to Germany, France, Hungary, Romania and Switzerland**
- **The geothermal heat pump boom in Switzerland and its background**

- **Geothermal use of tunnel waters – a Swiss specialty**
- **Geothermische Stromerzeugung: Umweltaspekte beachten!**
- **Utilization of Shallow Resources – Performance of Direct Use Systems in Beijing, China**

Pilot- und Demonstrationsprojekte

ERDWÄRMESONDEN UND ERDWÄRMESONDEN-FELDER

Misure di un impianto di riscaldamento con sonda geotermica a Lugano (TI) [12]: Pour les périodes juillet 2001 – juin 2002 et juillet 2002 – juin 2003, on obtient les valeurs suivantes:

	Jul. 01 – juin 02	Jul. 02 – juin 03
Coefficient de performance moyen (sans pompes)	4.1	4.2
Niveau de température à la sortie du condensateur	43.8 °C	43.6 °C
Niveau de température à l'entrée du condensateur	7.9 °C	8.3 °C

On observe une légère élévation de la température de fluide dans les sondes la deuxième année, ce

qui est probablement dû à l'effet de la recharge thermique du terrain par les capteurs solaires. L'analyse par simulations dynamiques permettra de quantifier les effets observés. Le modèle de pompe à chaleur (modèle dynamique – effet enclenchement et déclenchement - avec correction pour un débit différent du débit nominal) a déjà été calibré et permet de reproduire avec satisfaction les mesures (voir figure 3).

Grundwasser- Wärmepumpe mit Rückgabe-Turbinierung [13]: Im Zentrum von Würenlos soll ein Neubau mit Hilfe einer Grundwasser-Wärmepumpe mit Heizwärme versorgt werden. Diese Anlage zeigt einen sehr interessanten, innovativen Aspekt: nach Wärmeentnahme soll das Wasser bei der Rückspeisung in den Aquifer zur Stromgewinnung genutzt werden. Aus einer Tie-

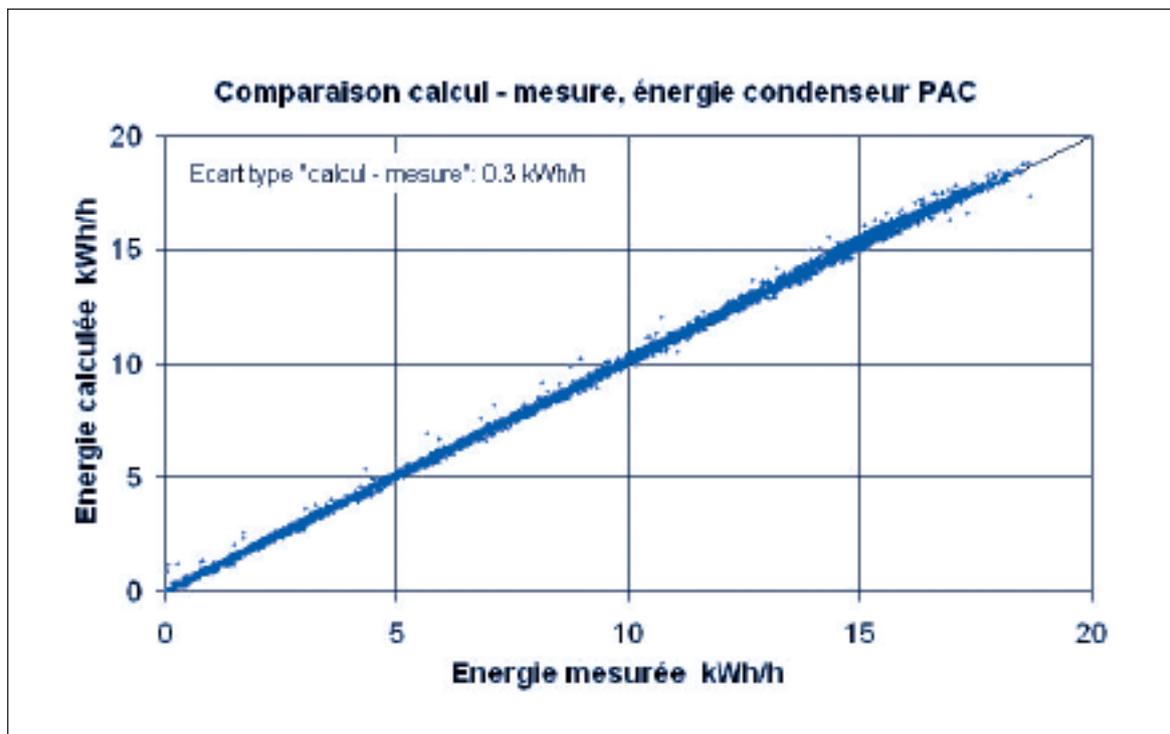


Figure 3: Comparaison entre calculs et mesures de la puissance thermique horaire délivrée au condensateur sur les 27 mois de la période de mesure.

fe von ca. 50 m wird Grundwasser zunächst zur Wärmepumpe (WP) gepumpt und soll dann in einer im Rückgabeburgen eingebaute Kleinturbine wieder verstromt werden. Tiefe, ungespannte Aquifere werden wegen der erhöhten Stromkosten zum Betrieb von Tauchpumpen in der Regel wärmetechnisch relativ selten genutzt, obschon tiefe Aquifere aufgrund der Grundwasser-Bestimmungen einen abgeminderten Trinkwasserschutz geniessen (geringer Sauerstoffgehalt, zu hohe Temperaturen und/oder erhöhter Mineralisierungsgrad). 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 für zukünftige geothermische Grossanlagen richtungsweisend werden.

Demonstrationsprojekt zur Energieeffizienz einer grossen Wohnüberbauung (Unteres Hompeli, SG) im Minergie-Standard [14]: Die Überbauung *Unteres Hompeli* besteht aus 4 Häusern, für deren Wärme-Versorgung insgesamt 11 EWS mit einer Gesamtlänge von 2'495 m Länge installiert wurden. Anfangs 2002 konnte von der EPFL für diese Anlage ein Respons Test durchgeführt werden.

Dolder Grand Hotel, Geothermiespeicher für kombiniertes Heizen und Kühlen [15]: Als geothermischer Energiespeicher für einen grösseren Um- und Erweiterungsbau des Prestigeobjektes Grand Hotel Dolder (d.h. komplett neue Haustechnik für den Hotelbetrieb, inkl. Wellnessbereich, etc.) soll ein grosses Erdwärmesondenfeld (ca. 10'000 m Sondenlänge) mit einem Volumen von ca. 250'000 m³ genutzt werden. Im Winter wird der Energiespeicher entladen (ca. 1 GWh) und über eine Absorptionswärmepumpe die Betriebstemperatur für die Warmwasserbereitung und die Heizung aufrechterhalten. Ab Frühling bis zum Herbst wird das Hotel über den geothermischen Energiespeicher gekühlt (ca. 1 GWh). Im vorliegenden Projekt wird in erster Linie das Temperaturfeld des Untergrundes gemessen und berechnet. Es werden auch Planungswerkzeuge entwickelt, die mit geringem Aufwand eine hohe Genauigkeit bei der Dimensionierung von grossen Geothermiespeichern aufweisen.

Wirtschaftlichkeitsermittlung einer Sondenisolation im obersten Abschnitt einer EWS-Anlage in Otelfingen (ZH) [16a]: Die Wärme-Produktion und die Wirtschaftlichkeit von einer nicht isolierten und einer isolierten EWS-Anlage wurden verglichen. Bei letzterer wurden die obersten 20 m sowohl des Sondenvor- als auch des Sondenrücklaufs mit einer Wärmeisolation

versehen, um den Kälteeinfluss im Winter zu eliminieren. Beide EWS weisen eine Tiefe von je 220 m auf und werden zur Beheizung von je einem Doppelfamilienhaus verwendet. Die Messungen zeigen, dass eine derartige Isolierung technisch einfach und wirtschaftlich ist - die erhöhten Investitionskosten werden längerfristig durch geringere Betriebskosten kompensiert.

WP – Anlage Chestonag Automation AG, Seengen (AG) [16b]: Für diese Industrieanlage wurden im Berichtsjahr vier EWS à 250 m Tiefe für eine kombinierte Wärme- und Kälteproduktion erstellt, wobei alle Sonden in ihrem obersten Bereich bis in eine Tiefe von 8 m Wärme isoliert wurden. Dies, um den Einfluss von Schwankungen der Oberflächentemperaturen möglichst einzuschränken. Im Jahr 2002 konnte eine JAZ von ca. 4 nachgewiesen werden, ohne dass eine gegenseitige Beeinflussung im EWS-Feld beobachtet wurde. Auch das free-cooling System erwies sich bis jetzt als erfolgreich.

EW-Sondenanlage Überbauung „Bahnhof Süd“ in Aarau [16c]: Zwecks Heizen und Kühlen dieses Bürogebäudes, mit einer Gesamtfläche von 7'210 m², wurden 16 Erdwärmesonden in zwei parallelen Reihen bis in eine Tiefe von je 150 m installiert. Zum Effizienzvergleich wurden die obersten 8 m der EWS der einen Reihe isoliert und die anderen nicht. Inklusive eines geothermischen Response Tests durch die EPFL, konnten die diversen Installationen für die Messüberwachung in diesem Jahr realisiert werden. Aufgrund der in der ersten Heizperiode erhaltenen Messdaten wird die geplante JAZ von 4.64 der WP praktisch erreicht werden. Die Funktionstauglichkeit der Heizanlage bedarf allerdings noch einer Systemoptimierung.

WÄRMENUTZUNG GEOSTRUKTUREN (ENERGIEPFÄHLE)

Regionalgefängnis Rheintal, Altstätten (SG): Beheizung und Klimatisierung mittels Energiepfählen, gekoppelt mit Erdwärmesonden [17]: 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-Bohrungen abgeteuft. Die erste Messperiode umfasst den Zeitraum vom 09.02.03 bis 01.10.03. Die bislang gemessene Heizenergie von ca. 143'000 kWh liegt in einer ersten Abschätzung innerhalb der projektierten Werte.

Energiepfählanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen [18]: Unter Einschluss aller techni-

schen Anlagen wurde wurde das Dock Midfield im November 2002 fertig gestellt und dem Betreiber Flughafen Zürich AG übergeben. Die Energiepfahlanlage wurde bereits ab Frühsommer 2002 provisorisch in Betrieb genommen. Wenn auch nur in Teillast, konnte das Umluft-Kältenetz erfolgreich mit Free-Cooling über die Energiepfähle betrieben werden. Seit Beginn der Heizperiode 03/04 wird nun mit der WP Heizwärme erzeugt.

Graps, SG: Messungen Energiepfahlanlage Dividella AG [19]: Bei einer Erweiterung von Büros und einer Produktionshalle sollen ca. 160 Energiepfähle mit einer aktiven Länge von je 24 m über eine WP eine Wärmeleistung von rund 175 kW bzw. eine Kälteleistung, im *free-cooling* Verfahren, von ca. 70 kW erbringen. Ein besonders innovativer Aspekt bei diesem Projekt ist die erstmalige Verwendung von gekoppelten Energiepfählen – d.h. 2 x 12 m lange Rammpfähle - wobei nun neu die gesamte Pfahllänge energetisch genutzt werden kann.

GRUNDWASSER-WÄRMENUTZUNG

Zweijährige Erfolgskontrolle (Messkampagne) der GW-WP Anlage „Pfarrhaus Bremgarten“ [20a]: 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 läuft zufrieden stellend mit einer JAZ von ca. 3.6.

Zweijährige Erfolgskontrolle (Messkampagne) der GW-WP Anlage „Feuerwehrmagazin und Wohnungen Sisseln, (AG)“ [20b]: 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. Auch diese Anlage läuft zufrieden stellend mit einer JAZ von ca. 3.9.

ÜBERTIEFE ERDWÄRMESONDEN

Tiefe Erdwärmesonde Weggis – Messkampagne zur Dokumentation der neuen Einflüsse beim Ausbau der Abnehmerleistung [21]: In den Jahren 1992 und 1993 wurde die Bohrung Weggis mit einer Endteufe von 2'302 m erstellt. Mit Hilfe dieser übertiefen EWS werden mehr als 40 Wohnungen beheizt bzw. mit Warmwasser versorgt. Der Direktheizungsanteil erreichte Werte über 60% der jährlichen Wärmemenge. Die dem Sondenkreislauf entnommene Wärme hat sich im Betriebsjahr 2001/2002 auf 420 MWh nahezu verdoppelt. Der Direktheizungsanteil ging

auf 8 % zurück. Die mittlere Quellentemperatur der Sonde liegt nun bei 37.2 °C und die mittlere Rückgabetemperatur in die Sonde bei 29.6 °C. Die Jahresarbeitszahl hat sich in dieser Zeit ebenfalls von ca. 6 auf 4.4 verringert.

WÄRMENUTZUNG VON TIEFEN AQUIFEREN (THERMALWASSER)

Exploitation du forage géothermique JAFE de Saillon [22]: L'exploitation du forage JAFE par pompage durant environ 3 ans n'a comporté aucun imprévu hydrogéologique ou technique majeur. Le débit était satisfaisant (6 L/s) et la température de l'eau stable (32 °C). Par contre, le principal utilisateur de la ressource géothermique, à savoir les Bains de Saillon, n'a pas pu utiliser l'eau thermique en raison d'interaction modifiant le chimisme de l'eau thermique injectée dans les bassins, entraînant des arrêts fréquents et prolongés du pompage. L'arrêt définitif du pompage intervenu en juin 2002 en raison d'une panne des pompes a mis en évidence plusieurs problèmes techniques liés à l'installation de pompage. Il faut souligner que la remise en production du puits JAFE ne sera jamais économique si les Bains n'arrivent pas à utiliser l'eau thermique pour leurs besoins. Pour cette raison, il faut absolument trouver une solution aux problèmes de chimie de l'eau et plus particulièrement à l'élimination du fer.

Etude de la valorisation des rejets thermiques des Bains de Lavey [23]: Ce projet permettra de proposer des solutions d'optimisation de l'utilisation de l'énergie de la source géothermale la plus chaude de Suisse. Son utilisation actuelle est limitée entre 63 et 34 °C, ce qui correspond à une utilisation facile de l'énergie. Au stade actuel de cette étude, il apparaît de nombreuses solutions qui doivent encore être évaluées et chiffrées. Mais il apparaît déjà que la solution finale sera vraisemblablement le résultat d'une combinaison des variantes. La quantité d'énergie à basse température est importante et si les optimisations internes sont réalisées, un solde d'eau thermique à haute température pourrait même être disponible.

NUTZUNG WARMER TUNNELWÄSSER

Wärmenutzung Hauensteintunnel: Wärmeversorgung Rankwog Trimbach [24]: Der Wärmeverbund nutzt die geothermische Wärme aus dem Hauensteintunnel mit einer Wärmepumpe (Nennleistung 410 kW). Der Energieanteil der Wärmepumpe von insgesamt 1'070 MWh resultierte in einer Heizölsubstitution von rund 103 t. Aufgrund von fehlenden Niedertemperaturbezü-

gern ist der Endausbau dieses Wärmeverbundes noch nicht erreicht.

Wärmenutzung Tunnelwasser, Basistunnel Lötschberg, Nordportal [25a]: Die Prognose der Alptransit geht von 80- 280 Liter/s mit einer Temperatur von 19-20 °C ab Portal Nord aus. Folgende Nutzungsmöglichkeiten dieses Bergwassers konnten näher untersucht werden: Nahwärmeversorgung zur Deckung des Raumwärmebedarfs und zur Brauchwarmwasserbereitung, Beheizung eines Tropenhauses mit Aquakultur bzw. eines Erlebnisbades, Raumheizung und Brauchwarmwasser für das BLS Erhaltungszentrum und die Halle für den Rettungszug.

Wärmenutzung Tunnelwasser, Basistunnel Lötschberg, Südportal [25b]: 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. Der Tunneldurchstich erfolgt voraussichtlich Ende 2004. Es konnten Nutzungsmöglichkeiten für die warmen Tunnelwässer im zukünftigen Gewerbegebiet Raron Ost bzw. Niedergesteln West identifiziert werden. Zusätzliche Möglichkeiten bestünden bezüglich Wärmenutzung für grosse Gewächshausanlagen und zur Beheizung von Fahrbahnen (d.h. bei Vereisungsproblemen der Kantonsstrasse auf der Tal-Südseite, geplante Autobahn).

Wärmenutzung Tunnelwasser, Basistunnel Gotthard, Nordportal [25c]: Nach heutigen Schätzungen werden nach Fertigstellung des Basistunnels 60-500 Liter/s Bergwasser mit einer Temperatur von 30-35 °C aus dem Nordportal ausfliessen. Am Hauptportal Erstfeld wird somit, bei einer Abkühlung auf 10 °C, eine Wärmeleistung von 3.3-23 MW_{th} zur Verfügung stehen. Die Machbarkeitsstudie soll nun wirtschaftlich interessante Wärmenutzer bzw. Nutzungsmöglichkeiten in den Gemeinden Schattdorf, Attinghausen, Erstfeld und Altdorf näher untersuchen.

Machbarkeitsstudie Tunnelwasser, Basistunnel Gotthard, Südportal [25d]: In Bodio, Pollegio und Biasca sind Gebietsausscheidungen getroffen worden, die mögliche Gebiete für die Tunnelwassernutzung eingrenzen sowie Gebäudekubaturen und Nutzungsarten aufzeigen. Diese Gebiete weisen ein beachtliches Wärmenutzungspotential auf. In den Gemeinden Bodio, Giornico und Personico sind Projektpläne für die mögliche Erstellung eines Thermalbades auf grösstes Interesse gestossen.

GEOTHERMISCHE KARTEN, POTENTIALE, MANUALS UND GÜTESIEGEL

Geothermische Karte Tessin. Wärme aus Boden und Wasser [26]: Dieses praxisnahe Projekt wurde nebst dem BFE durch den PSEL und die Azienda Elettrica Ticinese (AET) mitfinanziert. Für interessierte Anwender steht nun eine Nutzungskarte für geothermische Ressourcen und ein Katalog von thermischen Leitfähigkeiten an typischen tessiner Gesteinsproben zur Verfügung.

Evaluation du potentiel géothermique du Canton de Vaud [27]: Les investigations conduites en vue de déterminer le potentiel géothermique sur le territoire du Canton de Vaud dans le domaine des géostructures énergétiques (GE), des aquifères profonds (AP) et de la géothermie haute énergie (HE) ont permis de conclure que, sous certaines conditions, chacune de ces trois technologies offre d'intéressantes perspectives de valorisation. Dans le secteur des géostructures énergétiques il est apparu, que dans dix ans, les GE seraient à même de produire annuellement 6'000'000 de kilowatt-heures de chaleur et 500'000 de kilowatt-heures de froid. L'exploitation des aquifères profonds du Malm et du Dogger pourrait représenter des potentiels géothermiques de l'ordre de 4 à 5 MW_{th} par site de production, dans des zones à demande élevée de chaleur. En ce qui concerne la géothermie haute énergie, dans un laps de temps de 20 ans, on pourrait envisager la construction de trois centrales de 10 MW_{él} et 60 MW_{th} chacune, dans des centres urbains comme Lausanne, Yverdon-les Bains ou la région de Vevey-Montreux. Un projet déjà en cours à Genève pourrait entrer en service vers 2015- 2020.

Gütesiegel „geothermische Quelle“ (Qualitätssicherung- System) [28]: Ziel dieses Projektes ist die Sicherstellung der korrekten Auslegung der geothermischen Energiequelle für Wärme/ Kälte so wie die kombinierte Nutzungen mittels Grossanlagen (Definition nach VDI 4640: > 30 kW). Dies erfordert gute Kenntnisse der im Untergrund ablaufenden Vorgänge. Hier ist professionelles Engineering durch zertifizierte Geothermie- Spezialisten unerlässlich. Diese Zertifizierung soll an die bestehenden FWS- Gütesiegel *Wärmepumpe* und *Bohrfirmen* anschliessen.

Géostructures énergétiques- Manuel pour la planification, la construction et l'exploitation (MGE) [29]: L'utilisation de géostructures et de pieux énergétiques en particulier suscite un intérêt croissant sur le marché. Pourtant, il n'existe à l'heure actuelle aucune documentation résumée à l'intention des maîtres d'ouvrage, des architectes ou des installateurs en technique du bâtiment

susceptible de les assister dans la pose ou la réalisation de ces équipements. Le manuel «MGE», d'environ 80 pages, est prévu sous la forme d'un guide similaire à ceux élaborés précédemment sous l'égide de la SIA, avec le soutien de l'OFEN,

concernant les système exploitant la chaleur du sol à faible profondeur et le stockage souterrain de la chaleur. La publication se fera par les soins de la SIA, en principe dans la série *Documentation SIA*, comme précédemment.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Die Forschung erfolgt gemäss den im *Konzept der Energieforschung des Bundes* festgelegten Strategien, speziell betreffend Verpflichtung zur engen Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft in einem möglichst frühen Stadium. Neben der erwünschten Einbettung in die internationale Forschung liegt besonders grosses Gewicht bei der praktischen Umsetzung von Forschungsergebnissen. Dafür eignen sich bei der Geothermie ganz speziell die zweijährigen Messkampagnen zur technisch-wirtschaftlichen Erfolgskontrolle an P+D-Grossanlagen, da damit die Funktionstüchtigkeit von neuen geothermischen Nutzungstechnologien interessierten Kreisen (Architekten, Planern, Investoren, kantonalen Entscheidungsträgern, etc.) nahe gebracht und damit zur Nachahmung empfohlen werden können. Als Signalwirkung ebenfalls sehr wichtig sind die im Rahmen von EnergieSchweiz durchgeführten Potentialstudien im Kanton Waadt; eine praktisch eigenfinanzierte Fortsetzung ist im Jahr 2004 für den Kanton Freiburg geplant.

FORSCHUNG

Im Jahr 2003 gelang es, Finanzquellen für das Abteufen einer tiefen Produktionsbohrung (ca. 5'000 m) zu finden. Damit sollte im kommenden Herbst mit der geplanten Tiefbohrung am Standort IWB Werkhof Kleinhüningen begonnen werden können. Ein Konzept zur Einbindung von diesem Standort in das Fernwärmenetz ist erarbeitet. Dank der Funktion von Herrn Prof. L. Rybach als Chairman des IEA-Geothermal Executive Committee konnte das Projekt mit wichtigem Know-how von ähnlichen Hot-Dry-Rock-Projekten im Ausland versorgt werden. Der grösste Forschungsbedarf besteht bei der kombinierten Strom- und Wärmegewinnung. In dieser Technologie steckt ein bedeutendes energetisches Potenzial. Es existieren bereits mehrere nationale und internationale Forschungsprojekte im Rahmen der IEA und der EU-Rahmenprogramme mit starker schweizerischer Beteiligung. Mittels Bündelung aller in der Schweiz vorhanden Fachkräfte soll im Jahr 2004 mit einem umfassenden Forschungsschwerpunkt *Energieumwandlung* bzw. *Hybrid-Prozesse* be-

gonnen werden. Dabei geht es darum, die aus der Erde gewonnene Energie mit einer Feuerung - bevorzugt mit erneuerbaren Energieträgern gespeisen - ergänzt, um damit eine Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades zu erreichen. Nebst dem Projekt in Basel wurden auch in Genf - unter starker finanzieller Beteiligung von Kanton und Stadt - die Projektierungsarbeiten für ein HDR-Kraftwerk weitergeführt.

Die Forschungsziele 2003 in der un tiefen Geothermie (EWS, Geostrukturen, geothermischer Response Test, etc.) konnten weitgehend erreicht werden. Ergänzende Arbeiten werden 2004 weitergeführt. Damit die Anwendung der Geothermie einen festen Platz im Markt findet, sind für alle Nutzungstechnologien Qualitätssicherungs-Instrumente notwendig. Diese müssen entwickelt, überprüft und bei den massgebenden Stellen eingeführt werden.

P+D PROJEKTE

Das Schwergewicht liegt bei **Messkampagnen beim Betrieb von geothermischen Grossanlagen**. Das Konzept dabei ist, in verschiedenen Regionen der Schweiz den einwandfreien Betrieb von geothermischen Anlagen zu demonstrieren, um damit eine Multiplikation solcher Anlagen zu erreichen. Im Rahmen des energiepolitischen Programms EnergieSchweiz erfolgt begleitend dazu eine gezielte Informationstätigkeit der entsprechenden regionalen Informations-Stellen des Kompetenzzentrums *Geothermie*. Basierend auf den ermutigenden Forschungsergebnissen aus den beiden *AlpTransit*-Projekten steht nun die Verbreitung der Erkenntnisse an die Behörden der vier betroffenen Kantone durch EnergieSchweiz im Zentrum. Eine weitere sehr wichtige Umsetzung der Forschungsergebnisse durch EnergieSchweiz bildet die Identifikation von potentiellen Investoren zwecks zukünftiger Nutzung von warmen Drainagewässern aus den beiden Tunnelröhren (z.B. für Gewächshäuser, Erlebnis- und Wellnessbäder, Quartierbeheizungen, etc.). Am Lötschberg Nord-Portal in Frutigen konkretisieren sich die Pläne zur Erstellung eines Tropen-Gewächshauses bereits.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

- [1] M.O. Häring, (haering@geothermal.ch), ARBEITSGEMEINSCHAFT DHM, Basel: **Deep Heat Mining; Entwicklung der Hot-Dry-Rock/Hot-Wet-Rock Technologie in der Schweiz; 2003** (JB)
- [2] J. Wilhelm, (jules.wilhelm@bluewin.ch), ARBEITSGEMEINSCHAFT DHM, Genf: **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** (JB)
- [3] Th. Mégel, (megel@geowatt.ch), ARBEITSGEMEINSCHAFT GIA, Zürich: **Teilnahme am Geothermal Implementing Agreement der IEA (Annex III, Hot Dry Rock, Subtask C, Fortsetzung 2002)** (JB)
- [4] 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)
- [5] H. Graf (h.graf@mbn.ch), MATOUSEK, BAUMANN & NIGGLI AG, Baden: **Arteserkarte der Schweiz – Teilgebiet Basel - Luzern** (JB)
- [6] B. Lachal (bernard.lachal@cuepe.uinige.ch), Genève: **COOLTEL'REP: étude préliminaire du potentiel de rafraîchissement géothermique pour les relais de téléphonie mobile** (SB)
ENET 230171
- [7] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, Aarau: **Optimierung von Sondenisolationen im obersten Abschnitt von Erdwärmesonden** (SB)
- [8] L. Rybach (rybach@geowatt.ch), GEOWATT AG, Zürich: **Drahtloser Minidatenlogger für kontinuierliche Temperaturmessungen in Erdwärmesonden bis 350m Tiefe** (SB)
- [9] L. Lalui (lyesse.laloui@epfl.ch), EPFL – ENAC, Lausanne: **Automatisation et télétransmission des données pour les tests de réponse** (SB)
- [10] E. Kissling (kissling@tomo.ig.erdw.ethz.ch), SCHWEIZERISCHE GEOPHYSIKALISCHE KOMMISSION (SGPK), Zürich: **Geothermische Ressourcen. Erarbeitung und Bewirtschaftung des geothermischen Potentials der Schweiz** (JB)
- [11] L. Rybach (rybach@geowatt.ch), GEOWATT AG, Zürich: **Kompilation, Auswertung und Erfolgskontrolle von Messkampagnen an Erdwärmesonden- Energiepfahlsystemen sowie Grundwassernutzungen inklusive Wirtschaftlichkeitsanalysen** (JB)

Liste der P+D-Projekte

- [12] D. Pahud, (daniel.pahud@dct.supsi.ch), LEE – SUPSI, Canobbio: **Misure di un impianto di riscaldamento con sonda geotermica a Lugano (TI)** (SB)
- [13] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, Aarau: **Grundwasser- Wärmepumpe mit Rückgabe- Turbinierung** (JB)
- [14] Ch. Kapp, (ch.kapp@nek.ch), NEK UMWELTTECHNIK AG, Zürich: **Demonstrationsprojekt zur Energieeffizienz einer grossen Wohnüberbauung („Unteres Hompeli“, SG) im Minerogie- Standard** (JB)
- [15] B. Sigg, (info@doldergrand.ch), DOLDER GRAND HOTEL, Zürich: **Dolder Grand Hotel, Geothermiespeicher für kombiniertes Heizen und Kühlen** (JB)

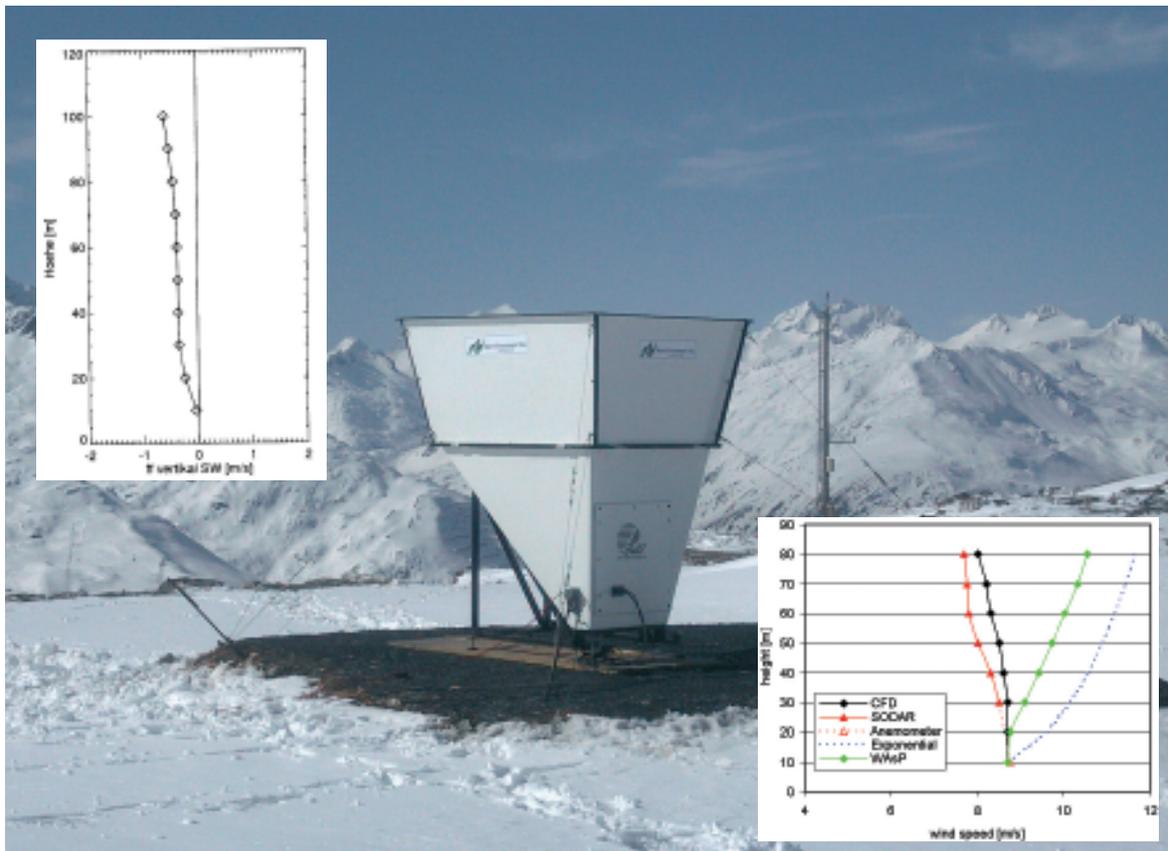
- [16] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, Aarau: **a) Wirtschaftlichkeitsermittlung einer Sondenisolation im obersten Abschnitt einer EWS- Anlage in Otelfingen (ZH)** (SB) ♦ **b) WP – Anlage Chestonag Automation AG, Seengen (AG)** (SB) ♦ **c) EW- Sondenanlage Überbauung „Bahnhof Süd“ in Aarau** (JB)
- [17] Ch. Kapp, (ch.kapp@nek.ch), NEK UMWELTECHNIK AG, Zürich: **Regionalgefängnis Rheintal, Altstätten (SG): Beheizung und Klimatisierung mittels Energiepfählen, gekoppelt mit Erdwärmesonden** (JB)
- [18] M. Hubbuch, (m.hubbuch@hswzfh.ch), FH WÄDENSWIL, Canobbio: **Energiepfählanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen** (JB)
- [19] M. Morath, (morath.marcel@lippuner-emt.com), ING. BÜRO LIPPUNER AG, Grabs: **Messungen Energiepfählanlage Dividella AG** (JB)
- [20] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, Aarau: **a) Zweijährige Erfolgskontrolle (Messcampagne) der GW- WP Anlage „Pfarrhaus Bremgarten“** (SB) ♦ **b) Zweijährige Erfolgskontrolle (Messcampagne) der GW- WP Anlage „Feuerwehrmagazin und Wohnungen Sisseln, (AG)“** (SB)
- [21] W.J. Eugster (wjeugster@swissonline.ch), POLYDYNAMICS ENGINEERING ZÜRICH, Zürich: **Tiefe Erdwärmesonde Weggis – Messkampagne zur Dokumentation der neuen Einflüsse beim Ausbau der Abnehmerleistung** (SB)
- [22] G. Bianchetti, (gbianc@vtx.ch), HYDROGEOLOGIE, GEOTHERMIE, GEOTECHNIQUE, Sion: **Exploitation du forage géothermique JAFE de Saillon** (SB)
- [23] 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** (JB)
- [24] D. Zürcher, (daniel.zuercher@durena.ch), DURENA AG, Lenzburg: **Gewinnung geothermischer Energie aus dem Hauenstein Basistunnel** (SB)
- [25] G. Oppermann (gerhard.oppermann@gruneko.ch), GRUNEKO AG, Basel: **a) Wärmenutzung Tunnelwasser, Basistunnel Lötschberg, Nordportal** (SB) ♦ **b) Wärmenutzung Tunnelwasser, Basistunnel Lötschberg, Südportal** (JB) ♦ **c) Wärmenutzung Tunnelwasser, Basistunnel Gotthard, Nordportal** (JB) ♦ **d) Machbarkeitsstudie Tunnelwasser, Basistunnel Gotthard, Südportal** (SB)
- [26] M. Thüring, (thuering@ist.supsi.ch), INSTITUTO SCIENZE DELLA TERRA – SUPSI, Canobbio: **Geothermische Karte Tessin. Wärme aus Boden und Wasser – Kanton Tessin** (SB)
- [27] J. Wilhelm, (jules.wilhelm@bluewin.ch), INGENIEUR-CONSEIL, Pully: **Evaluation du potentiel géothermique du Canton de Vaud** (SB)
- [28] W.J. Eugster (wjeugster@swissonline.ch), POLYDYNAMICS ENGINEERING ZÜRICH, Zürich: **Gütesiegel „geothermische Quelle“ (Qualitätssicherung- System)** (JB)
- [29] J. Wilhelm, (jules.wilhelm@bluewin.ch), INGENIEUR-CONSEIL, Pully: **Géostrutures énergétiques – Manuel pour la planification, la construction et l'exploitation (MGE)** (JB)

PROGRAMM WIND

Überblicksbericht zum P+D-Programm 2003

Robert Horbaty

robert.horbaty@enco-gmbh.ch



Ermitteln von vertikalen Windprofilen mit einem SODAR Windmessgerät

Sowohl am Standort Grap Sogn Gion als auch auf dem Gütsch wurden die Windmessungen mit Ergebnissen eines akustischen Windmessgerätes (SODAR: SOund Detecting And Ranging), ergänzt, welches Resultate bis auf eine Höhe von über 100 m über Grund liefert.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Zur Beschreibung des generellen Umfeldes zitieren wir im Folgenden aus der UBS-Broschüre zum (Lux) *Equity Fund* [23]:

*Die Deregulierung und Liberalisierung der Energiemärkte führt u.a. zu einer Dezentralisierung der gesamten Energieproduktion. Dadurch werden Technologien und Lösungen mit **kleiner Kapitalintensität und kostengünstigen Produktionskosten** favorisiert. Neu geschaffene gesetzliche Regelungen - wie z.B. eine Einspeisevergütung für Elektrizität aus nachhaltigen Energien - beschleunigen die Verbreitung erneuerbarer Energien in liberalisierten Märkten. In den letzten Jahren wuchs das **Segment der Windenergie** mit über 30% pro Jahr. Bis zum Jahr 2010 soll in der EU eine Erhöhung der Elektrizitätsproduktion aus erneuerbaren Energien **von heute 14 auf 22%** erzielt werden. Bei den aktuellen Wachstumsprognosen - unter Einbezug der Zunahme des Elektrizitätsverbrauchs - sollen bis 2010 in Europa 50'000 Turbinen installiert sein. Dies entspricht **drei Mal der global installierten Menge** im Jahr 2001.*

Das Konzept der *Energieforschung des Bundes 2000 - 2003* [24] definiert kurz- und mittelfristig folgende **Schwerpunkte für den Bereich Windenergie**:

- **Standortabklärungen** und Projektentwicklungen im gebirgigen Terrain unter klimatisch schwierigen Voraussetzungen
- **Förderung** von Einzelprojekten für Nischenprodukte, Aufbau eines **Kompetenzzentrums Windenergienutzung im Gebirge**.
- Klärung von windspezifischen **Akzeptanzproblemen**.

- Förderung von **Pilot- und Demonstrationsanlagen**, auch im Kontext mit Konzepten zur **dezentralen Stromversorgung von Randregionen**.

Das von der CORE anlässlich der Energieforschungskonferenz im November 2003 präsentierte *Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 - 2007* [25] 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.*

Konkrete Ziele für die Berichtsperiode waren:

- Steigerung Akzeptanz von Windenergieprojekten
- Erhöhung der Planungssicherheit für den Bau von Windkraftanlagen
- Weitere Erhöhung des Anteil der Windenergie an unserer Stromversorgung
- Auswertung Betriebserfahrungen von Projekten in *arktischem* Klima
- Integration der gewonnen Einsichten im Rahmen von internationalen Projekten.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

ERHÖHUNG DER AKZEPTANZ DER WINDENERGIENUTZUNG

Nach wie vor kämpft die Branche nicht nur gegen schwierige politische Rahmenbedingungen und Akzeptanzprobleme (z.B. in Sainte Croix und beim Projekt Crêt Meuron). Es werden heute Projekte mit einem Investitionsvolumen von 44 Mio Franken und einer jährlichen Energieproduktion von 25 GWh blockiert. Um die in EnergieSchweiz

gesetzten Ziele (50-100 GWh Windstrom bis 2010) erreichen zu können, haben sich die Bundesämter für Energie (BFE), für Raumentwicklung (ARE) sowie für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) entschlossen, im **Konzept Windenergie Schweiz** [3d], [3e], [7] Grundlagen für die Standortwahl von Windenergieanlagen zu erarbeiten.

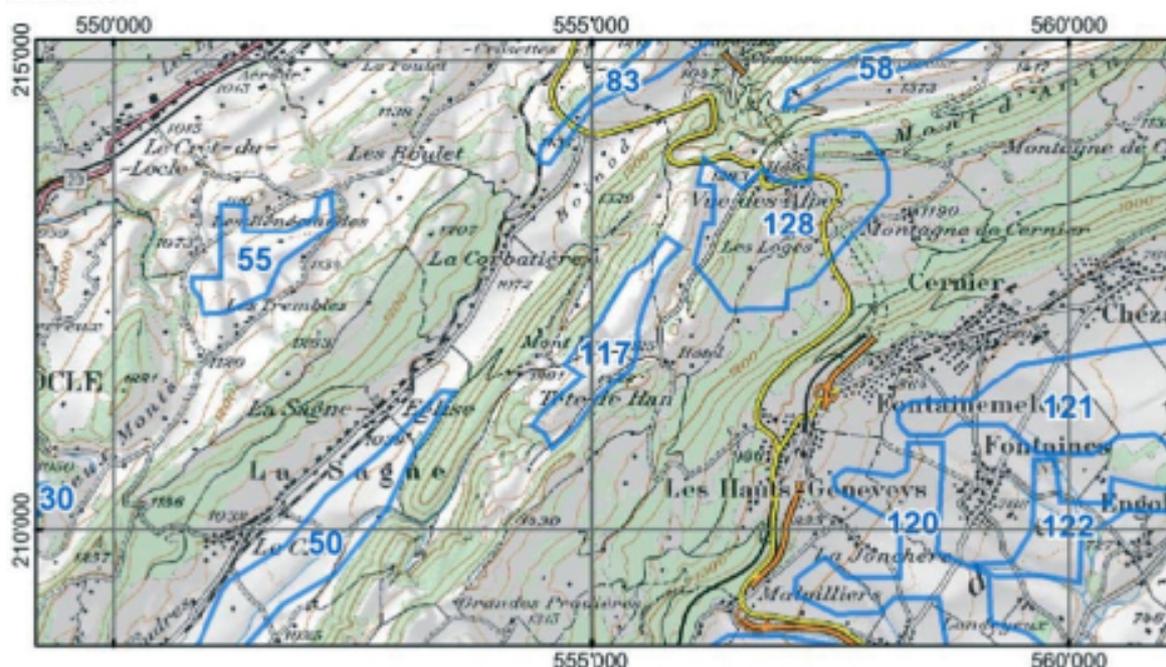
Strom aus Windenergieanlagen kann auch in der Schweiz vergleichsweise günstig produziert

werden. Er kann einen Beitrag zur Deckung der Nachfrage nach sog. Ökostrom leisten. Dies führt dazu, dass zahlreiche Projekte für neue Windenergieanlagen geplant sind oder zumindest evaluiert werden. Diese Entwicklung wird von Kreisen des Landschaftsschutzes sehr kritisch beurteilt. Das Hauptziel der heute als Vernehmlassungsentwurf vorliegenden Arbeit war denn auch - in Zusammenarbeit mit den interessierten Kreisen - Grundsätze und Kriterien für die Wahl von Standorten für Windparks zu erarbeiten und anschliessend konkrete Standorte zu evaluieren. Mittels Modellierung wurden landesweit 110 Standorte für Windparks identifiziert und das mögliche Potenzial der Energieerzeugung berechnet (Beispiel Fig. 1).

Die ausgewiesenen Standorte müssen auf kantonaler Ebene im Rahmen der Sach- oder Richtplanung vertieft geprüft werden. Es ist nicht auszuschliessen, dass bei dieser Prüfung weitere Standorte gefunden werden, welche die angewendeten Grundsätze und Kriterien erfüllen. Es ist wünschenswert, dass die betroffenen Kantone, unter anderem gestützt auf diese Grundlage, eigene Tätigkeiten zur Förderung der Windenergie auslösen.

Weitere Projekte in diesem Schwerpunkt sind: **Auswertung Publikumsfrage Windenergie** [1], [4], **Rechtliches Regime der Windenergie** [2] und **Sicherheitsrichtlinien für Windenergieanlagen in der Schweiz** [5b].

Situation



Figur 1: Darstellung der Standorte (eingerahmte Zonen) aus dem Konzept Windenergie Schweiz, Beispiel Region Vue des Alpes

Da an diesen Standorten theoretisch viel mehr Anlagen installiert werden können, als zur Erfüllung des Endziels von 50-100 GWh notwendig wären, wurden unter Berücksichtigung der Kriterien aus der Begleitgruppe eine Auswahl von 40 prioritären Standorten vorgenommen. Mit der Installation von total 307 Anlagen mit einer Leistung vom je 1.3 MW und einer Nabenhöhe von 70 m könnte an diesen Standorten 512 GWh Windstrom generiert werden.

AUFBAU EINES KOMPETENZZENTRUMS WINDENERGIE

Schweizerische Fachleute aus dem Bereich Meteorologie, Anlagenprojektierung und -betrieb haben – nicht zuletzt dank der Unterstützung des Bundes – über die Jahre hinweg ein grosses Know-how in der Planung, der Projektierung und im Betrieb von Windkraftanlagen in gebirgigen Umfeld erarbeitet. Dieses Fachwissen wird nun im Rahmen eines Interreg-Projekts weiter vertieft:

Das Projekt **Alpine Wind Harvest** [5a] dient der Regionalförderung im Alpenraum. Die Förderung der Windenergie in der Schweiz ist eine Aufgabe, welche das BFE seit längerer Zeit verfolgt. *Alpine Wind Harvest* ermöglicht, vom Erfahrungsschatz der Projektentwicklung beispielsweise in Österreich – welche weit fortgeschritten ist – zu profitieren, die nationalen Arbeiten (*Nationales Windkonzept*) in einem weiteren Expertenkreis vertieft zu beurteilen und weiterzuentwickeln und gezielt regionale Förderung (Windmessungen, Modellierungen) zu betreiben.

Die allgemeinen Projektziele sind: regionale Förderung der Windenergie, Erfahrungsaustausch über alpine Windkraftprojekte, Einbezug von Know-How-Austausch mit benachbarten Ländern über Projektentwicklung, Weiterentwicklung der nationalen Förderung und Austausch von Erfahrungen mit sozioökonomischen Aspekten. Im Jahre 2003 wurden die inhaltlichen und die administrativen Aspekte des Projekts geklärt und im Jahr 2004 soll die eigentliche Arbeit in Angriff genommen werden.

Windmessungen Crap Sogn Gion mit Sodar und 10m Mast [11], [3b]: Um die Windverhältnisse am Crap Sogn Gion genauer abschätzen zu können wurde während 4 Monaten eine Windmessung mit einem 10-m-Mast durchgeführt. Dabei wurden Windgeschwindigkeit und Windrichtung aufgezeichnet. Parallel zur Messung am 10-m-Mast wurde während 2 Monaten (November/Dezember 2002) eine SODAR-Messung durchgeführt. Dieses Messprinzip ermöglicht die Messung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung von 20 bis 150 m über Grund in Schritten von 10 m und somit die Ermittlung des mittleren vertikalen Profils der Windgeschwindigkeit.

Das obere Diagramm auf dem Titelbild zeigt, dass bei Südwestwind eine signifikante abwärts gerichtete Komponente der Windgeschwindigkeit vorliegt. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Messstation am nordöstlichen Ende der Kuppe lag, und der Wind sich nach Überströmen der Kuppe in den höheren Lagen bereits in der Abwärtsbewegung befindet. Bei Nordwestwind ist diese Komponente deutlich kleiner. Die gängigen Windmodelle gehen von einer Zunahme der Windgeschwindigkeiten mit steigender Distanz vom Boden aus – dies wegen der abnehmenden Geländerauhigkeit. Die Messung (siehe unteres Diagramm auf Titelbild) zeigt aber, dass die Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe gar abnimmt, was auch auf dem Gütsch festgestellt wurde. Für den alpinen Bereich sind die gängigen Windmodelle für Kuppen und Kreten ggf. zu überarbeiten.

Weitere Projekte mit Schwergewicht auf der Nutzung der Windenergie im Gebirge und Standortabklärungen sind: **Unterhalt Winddatenbank 2003** [3a], **Windenergiekonferenz BOREAS** [3c], **Standortabklärungen Arosar Weisshorn** [9], **Windenergiestandorte Flims-Laax; Machbarkeitsstudie** [10] und **Machbarkeitsstudie für Windenergienutzung in Davos** [12].

KONZEPTE FÜR DEZENTRALE STROM-PRODUKTION IN RANDREGIONEN

Die Versorgung von Berghütten mit Strom aus Windenergie wird im Projekt **Umfrage Windenergie bei SAC-Hütten** [6] untersucht. Auf der Basis einer Umfrage beim SAC wird der Erfahrungsaustausch über den Bedarf für entsprechende Anwendungen initiiert (www.suisse-eole.ch/images/1300/petites-eoliennes-d.pdf).

Marktstudie Aventa Leichtwindanlagen [8c]: Die Aventa AG in Winterthur entwickelt und baut – als einzige Firma in der Schweiz – komplette Windkraftanlagen. Deren Produkte sind für eher windschwache Standorte ausgelegt und fügen sich dank ihrer geringen Grösse relativ gut ins Landschaftsbild ein. Problematisch für die weitere Verbreitung dieses Produktes sind jedoch die hohen Gestehungskosten der produzierten Energie, bzw. die hohen spezifischen Investitionskosten. Mit einer Studie werden nun die Marktchancen dieses Produktes fundiert analysiert im Hinblick auf:

- Anpassungen der Anlage an die Bedürfnisse von Drittwelt- und Schwellenländer bei gleichzeitiger Kostenreduktion durch Vereinfachung
- Kostenreduktion durch Up-Scaling, wobei der Landschaftsverträglichkeit nach wie vor zentrale Bedeutung zukommen soll.

Das Projekt fördert indirekt den weiteren Ausbau der Windenergie in der Schweiz und trägt zum Aufbau und Erhalt von einheimischem Know-How auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien bei. Der Nischenmarkt mit kleineren Windkraftanlagen konnte bis anhin mit spezifischer Förderung unterstützt werden; in Zukunft sind für entsprechende Projekte jedoch kaum mehr öffentliche Mittel vorhanden. Die vorliegende Marktstudie soll weitere Informationen für die Chancen dieses Produkts in der Schweiz und im Ausland bringen.

Erstellen einer Leichtwindanlage auf dem Siloturm der Landi Marthalen [13]: Dieser bisher wohl ungewöhnlichste Standort für eine AV-7 Leichtwindanlage der Aventa AG findet sich auf dem 35 m hohen Silo der Landi in Marthalen (Fig. 2). Betreiberin ist die Genosol Martella, die örtli-

che Solargenossenschaft, die ihren Kunden neben Strom aus einer Solaranlage nun auch sauberen Strom aus Windenergie anbieten kann. Eine spezielle statische Konstruktion machte es möglich, den 1500 kg schweren Mast und die Gondel mit 1100 kg (inkl. Flügel) sicher auf dem Gebäude zu montieren. Die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe (50m über Boden) beträgt 3.2 m/s, was zu einem Stromertrag von 12000 kWh/a führt.



Figur 2: Eine 7-kW-Windkraftanlage auf dem Silo der landwirtschaftlichen Genossenschaft in Marthalen

Zum Schwerpunkt *dezentrale Stromproduktion in Randregionen* zählen auch die Projekte: **Standortabklärung und Messung Leichtwindanlage** [8a], **Nutzung der Windenergie im Kanton Graubünden** [8b] und **Leichtwindanlage Rüttenen** [14].

ENTWICKLUNG VON INNOVATIVEN KOMPONENTEN UND VON SPEZIFISCHEN KONZEPTEN

800-kW-WKA Gütsch [15]: Jahresproduktion 720'000 kWh, Verfügbarkeit knapp 60%, weit über 1000 Alarme; das ist die ernüchternde Bilanz der Windkraftanlage auf dem Gütsch ob Andermatt. Nach der Montage und der sich in die Länge ziehenden Inbetriebsetzung im Herbst 2002 schaute man optimistisch ins Jahr 2003. Der Anlagebetreiber (EW Ursern) hofft nach wie vor, mit dem Konzept der getriebelosen Anlage mit variabler Drehzahl und permanent erregtem Generator für diesen speziellen Standort die richtige Wahl getroffen zu haben. Wie aus den eingangs

erwähnten Zahlen abzuleiten ist geblieben die Probleme aber leider nicht aus, z.B.:

- Leckagen zwischen Getriebe und Motor der Pitchregulierung infolge schlechter Dichtungen, welche mehrere Antriebsmotoren durch das eindringende Öl zerstörten.
- In der Elektronik der Pitchregulierung mussten mehrmals Prints ersetzt und modifiziert werden.
- Der Umrichter verursachte häufig Abschaltungen aus noch nicht bekannten Gründen.
- Ein Vollastbetrieb war bis heute aus verschiedenen Gründen noch nicht möglich.
- Eines der Rotorblätter erlitt aus noch unbekanntem Gründen einen ca. 3m langen Riss an der windabgerichteten Kante, welches einen spektakulären Einsatz für eine provisorische Reparatur zur Folge hatte. (Fig. 3).

Erschwerend kommt dazu dass der Anlagenlieferant Lagerwey Konkurs anmelden musste.

Positiv hervorzuheben ist die Warmluftblattheizung der Rotorblätter die soweit effizient funktionierte. Allerdings besteht in der Sensorik zur Eiserkennung noch Verbesserungspotential. Die Akzeptanz in der Bevölkerung und das grosse Interesse an Besichtigungen der Anlage sind sehr erfreulich. Fast 5% der Abonnenten im Versorgungsgebiet des EW Ursern konnten zur Bestellung von zertifiziertem Ökostrom *naturemade star Gotthardenergie* animiert werden. Auch konnte mit dem EW Altdorf und der Rätia Energie je einen Vertrag über den Verkauf von Ökostrom abgeschlossen werden.

Fazit des Anlagenbetreibers: *Trotz erheblichen Schwierigkeiten sind wir von der Windenergie überzeugt und gewillt weiter zu machen. Tatsache ist, dass wir an der Windenergie und an unserem Ziel, noch weitere Anlagen auf dem Gütsch zu installieren, festhalten wollen.*



Figur 3: Reparatur des Rotorblattes der Anlage Gütsch im Dezember 2003

Erfahrungen aus Anlagen in schwierigem Gelände und unter rauen klimatischen Bedingungen werden auch im Projekt **Alpine Wind Harvest** [5a] ausgetauscht.

Nationale Zusammenarbeit

Im **Energieforschungsprogramm *Elektrizität*** läuft – als konkretes Resultat der vielfältigen Erfahrungen mit der Gütsch-Anlage – ein Projekt für die Entwicklung eines Umrichters der Leistungsklasse 1.5 MW mit der Firma *Technocon*.

Die **EPFL (Institut LASEN)** [27] betreut Windenergie-Projekte, v.a. auch im Zusammenhang mit Entwicklungszusammenarbeit.

An der **Fachhochschule Wallis** [28] bearbeitet ein Team Projekte zur Nutzung der Windenergie. Aktuell wird ein Projekt formuliert, in welchem – in Zusammenarbeit mit Aventa, Bartholdi, Technocon und dem EW Brig-Naters – kostengünstige Leistungselektronik zur Steuerung von kleineren Windkraftanlagen entwickelt werden soll.

Die **HTW in Chur** [29] betreibt im Rahmen des Studiengangs *Prozess- und Anlagentechnik* als Pilotprojekt eine kleine Windkraftanlage auf ihrem Dach (Fig. 4).

Die **Suisse Eole** [30] koordiniert alle Aktivitäten zur indirekten Förderung der Windenergienutzung in der Schweiz – in Zusammenarbeit mit kantonalen Energiefachstellen, Energieversorgern und Planern. Da die Geschäftsführung dieser Organisation und die Programmleitung *Wind* in Personalunion geführt werden, ist eine optimale Abstimmung sichergestellt. Aufgrund der Empfehlungen einer Evaluation wird sich Suisse Eole als



Figur 4: Strom dank Windenergie – ein neues Pilotprojekt der HTW Chur

eigentliches **Kompetenzzentrum Windenergie** positionieren.

Suisse Eole ist auch im Vorstand der **Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz (AEE)** [31] und im **Verein für umweltgerechte Elektrizität (VUE)** [32] vertreten und nimmt dort die Anliegen vor allem der nicht Gebäude gebundenen erneuerbaren Energien, wie Wind, Kleinwasserkraftwerke, etc. wahr. Mit dem *Konzept Windenergie Schweiz*, haben Akteure aus den Natur- und Landschaftschutzorganisationen, der Elektrizitätsbranche und der Windenergie den **Dialog** aufgenommen.

Internationale Zusammenarbeit

Seit Mai 2002 beteiligt sich die Schweiz am *IEA-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development*, Annex **Wind Energy in Cold Climates** [33]. Anlässlich der BOREAS-Windenergie-Konferenz dieses Programms wurde aus der Schweiz das Papier **Wind measurements and modelling in the Swiss alps** präsentiert [34]. Ein internationaler Erfahrungsaustausch zu diesem Thema fand am 21.11.2003 in Bern statt.

Alpine Windharvest [5a] ist ein Projekt im Rahmen des *EU INTERREG III B Alpine Space Programme* mit dem Ziel: *Development of 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*. www.sbg.ac.at/pol/windharvest/

Mit dem *Deutschen Windenergie Institut (DEWI)* [35] 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 und der Fördergesellschaft für erneuerbare Energien in Freiburg im Breisgau.

Die Schweizer Firmen *Technocon* und *Bartholdi* sind massgeblich an der Entwicklung einer Windkraftanlage der Firma *Leitner* im **Südtirol** beteiligt. Planungsbüros, wie *NEK AG*, *Meteotest*, *ENCO GmbH*, entwickeln **Windenergie-Projekte in Europa** und im Rahmen der **Entwicklungszusammenarbeit**.

Unter Anwesenheit von Bundesrat Leuenberger und des britischen Wirtschaftsministers wurden

anlässlich einer Einladung der britischen Botschaft auch die Möglichkeiten des **Exports von Wind-**

energie Know-How nach Grossbritannien diskutiert.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

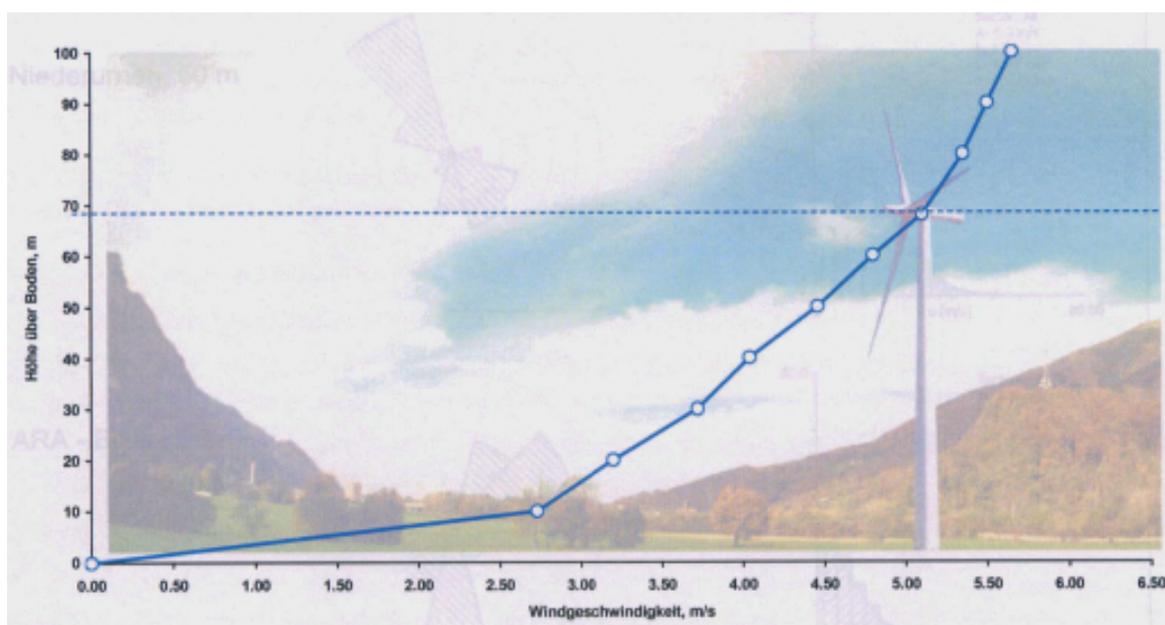
Das Energieforschungskonzept 2004 – 2007 [26] unterstreicht die Bedeutung der Entwicklung von **innovativen Komponenten und spezifischen Konzepten** für die Windenergienutzung in der Schweiz. Mit P+D-Projekten förderte das Programm *Wind* sowohl den Einsatz von neuen Technologien schweizerischer Unternehmen als auch das Entwickeln von Know-How für Standortabklärungen:

Windmessung in der Linthebene [16]: Zur Erfassung der Windverhältnisse in der Linthebene wurde die Messkampagne in Niederurnen durch eine zusätzliche Messung in Bilten ergänzt und die Auswertungen in einem Windatlas für die Linthebene dargestellt. Das vorliegende Windgutachten für den Messstandort Niederurnen basiert auf der Aufzeichnung von Winddaten, die mit einer 50 m hohen temporären Messanlage erfasst wurden. Nach einer Messkampagne von zwölf Monaten erlauben die Auswertungen folgenden Schluss: aufgrund der Windverhältnisse ist der Messstandort Niederurnen zur Nutzung der Windenergie bedingt geeignet, die Windstärke ist nicht optimal. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt auf 50 m Höhe 4.45 m/s. Die Extrapolation auf Nabenhöhe ergibt für 68 m Höhe über

Grund eine mittlere Windgeschwindigkeit von 5.1 m/s (s. Fig. 5).

Projektrelevante Studien und Abklärungen im Zusammenhang mit einem Windenergieprojekt auf dem Gotthardpass [21]: Aufgrund der Tatsache, dass für das Projekt (7 Windturbinen mit einer Leistung von je 1.3 MW, mögliche Energieproduktion 15 GWh) keine Ausnahmegenehmigung nach RPG 24 erlangt werden konnte, wird eine Umzonung für das gesamte in Anspruch zu nehmende Gebiet vorgenommen. Die Ergebnisse hierzu werden im Frühjahr 2004 erwartet. Parallel dazu wurden mit allen betroffenen Institutionen Verhandlungen über das Projekt geführt. Mit Ausnahme des Vereins zum Schutz der Kulturgüter sind grundsätzlich alle Verhandlungsinstitutionen dem Projekt gegenüber positiv eingestellt. Voraussichtlich wird die Azienda Elettrica Ticinese (AET) die Anlagen zukünftig betreiben.

Zur besseren Abschätzung der Windverhältnisse auf Nabenhöhe sowie zur Evaluation weiterer Anlagen standorte wurden im vergangenen Sommer zusätzliche Windmessungen durchgeführt, wofür 10 m-Messmasten sowie ein Sodargerät zum Einsatz kamen. Die bisherigen Ergebnisse der Mes-



Figur 5: Mittlere Windgeschwindigkeit für den Messstandort Niederurnen: 4.45 m/s auf 50 m Höhe und 5.1 m/s auf 68 m Höhe extrapoliert

sungen unterstreichen die grundsätzlich guten Windverhältnisse auf der Passhöhe. Weitere Arbeiten wurden im Zusammenhang mit der Detail-evaluation der Anlagenstandorte vorgenommen, indem mit den Umweltverbänden die Kriterien für eine möglichst umweltgerechte Positionierung definiert und die Standorte entsprechend angepasst worden sind. Voraussichtlicher Baubeginn ist 2005.

Weitere P+D-Projekte sind: **Standortabklärungen Les Bréleux** [17a], **Standortabklärungen Saint-Brais** [17b], **Windmessung in Illnau Effretikon** [18], **Windmessungen Schwengimatt** [19], **Windmessungen Les Bois / Le Peuchap-**

patte JU [20] und **Bau und Erfolgskontrolle Windkraftanlage Haldenstein Chur** [22].

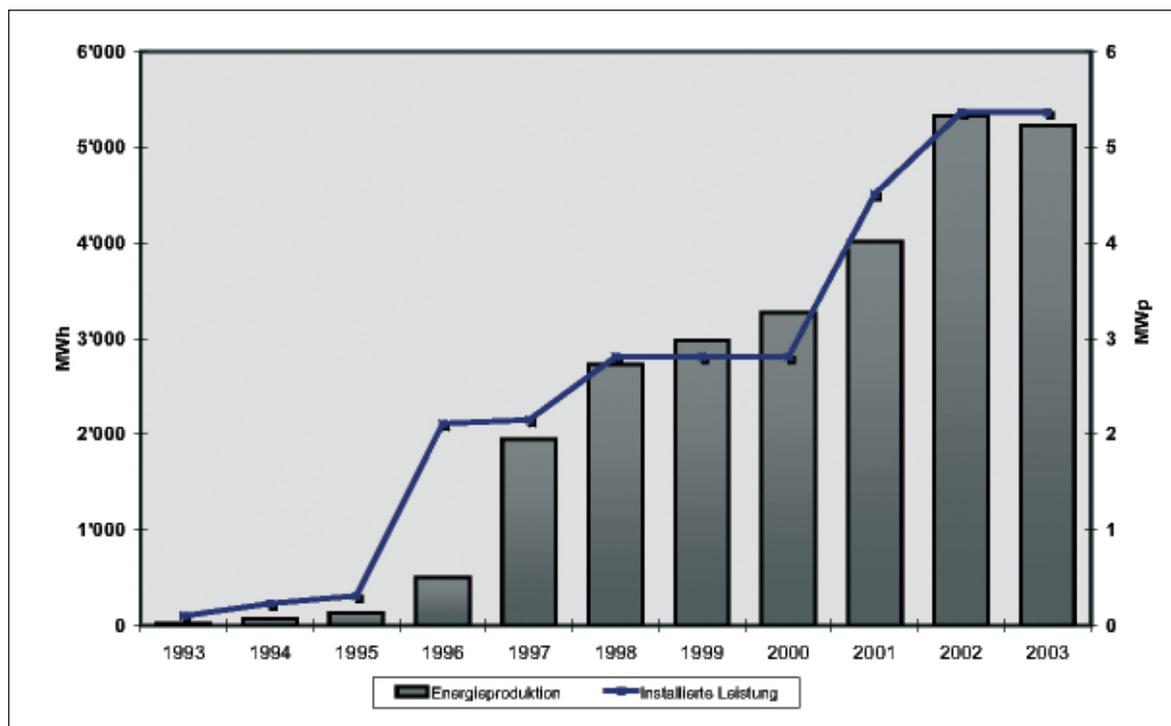
Die finanzielle Unterstützung der Standort-Abklärungen von Windenergieprojekten hat wesentlich dazu beigetragen, dass heute Anlagen mit über 40 MW Leistung in Planung sind. Aufgrund der Budgetkürzungen muss leider davon ausgegangen werden, dass dieser Bereich in Zukunft stark beschnitten wird. Suisse Eole, das Kompetenzzentrum für die Nutzung der Windenergie in der Schweiz, wird jedoch mit geringen Mitteln die Lancierung von Projekten weiter fördern können. Der Start der Projekte [20] und [22] wurde verzögert und bis anhin wurden noch keine Aktivitäten ausgeführt.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

GENERELLES

Das Berichtsjahr war für die **Windenergie-Branche in der Schweiz** durchzogen: Aufgrund langwieriger Planungsabläufe konnten **keine zusätzlichen Anlagen** errichtet werden. Der Wind blies **durchschnittlich 20% weniger als im Jahresmittel** seit Beginn der Erfassungen 1989. Windintensive Standorte mussten bis zu 11% Ertragseinbussen hinnehmen, windschwächere Standorte sogar bis zu 28% [24]. Positiv zu Buche

schlägt die Tatsache, dass die Schweizerische Stiftung für Landschaftsschutz ihre **Einsprache gegen das Windprojekt im Biosphärenreservat Entlebuch zurückgezogen** hat, nachdem ihre Anliegen in die Planung eingeflossen waren. Die 21 in der Schweiz installierten Windenergieanlagen, mit einer **Gesamtleistung** von 5.36 MWp, erzeugten im Berichtsjahr 5'231 MWh Elektrizität (Fig. 6). Aufgrund des sehr schlechten Windjahres liegt dieser Wert 3 % tiefer als 2002.



Figur 6: Aktueller Stand der Elektrizitätsproduktion aus Windenergie in der Schweiz

POSITIVE ENTWICKLUNGEN

- Die energiepolitischen Abstimmungen haben die **Popularität der Windenergie** und die Präsenz in den Medien markant gesteigert.
- Die Erarbeitung des „Konzeptes Windenergie Schweiz“ [3d], [3e], [7] und die Umfrage zur Akzeptanz [1] führten zu einer gewissen **Entkrampfung** der Oppositionshaltung der Landschaftsschützer.
- Die Gemeindeversammlung **Entlebuch** hat im Dezember 2003 **einstimmig die geänderte Nutzungsplanung genehmigt**, welche nun den Bau der seit mehr als 6 Jahren in Planung begriffenen Windkraftanlage beim Hof der Fa. Aregger ermöglichen wird. Auch die Schweizerische Stiftung für Landschaftsschutz hat ihre Einsprache zurückgezogen, nachdem ihre Anliegen in die Planung eingeflossen waren. Der Wunsch, die Belastung des Landschaftsbildes klein zu halten, wurde in die Forderung transformiert, dass die Höhe der Nabe die wichtigen Landschaftselemente um nicht mehr als einen Drittel überragen darf.
- Die breit angelegten Aktivitäten zur **Entwicklung von Planungsinstrumenten** führten zu einem hohen Standard an Hilfsmittel für die Planer und Projektentwickler - auch im internationalen Kontext. www.suisse-eole.ch/tech-pro-outils-d.htm
- **Die Juvent SA** hat beschlossen, beim Windpark Mt.Crosin zwei weitere Anlagen mit einer Leistung von **je 1.75 MW** zu installieren.
- Ein Statusreport mit einer umfassenden Übersicht zur **Fragestellung der Vereisung** und des kalten Klimas ist publiziert [36].

BREMSENDE ENTWICKLUNGEN

- Nach wie vor sind **grosse baureife Projekte** (z.B. Crêt Meuron, Sainte Croix) wegen Einsprachen und langwierigen Planungsverfahren **blockiert**.
- Im Bereich **Ökostrom macht sich eine gewisse Zurückhaltung** breit. Die vom UVEK im März 2003 eingesetzte Expertenkommission hat die Eckwerte für die neue Elektrizitätswirtschaftsordnung ELWO erarbeitet. Es bleibt jedoch unklar, in welchem Tempo auch Haushaltkunden ihre (Öko-)Stromanbieter frei wählen können und welchen Stellenwert die erneuerbaren Energien im Zusammenhang mit der Marktöffnung haben werden.
- Die **Verpolitisierung der Windenergie** im Zusammenhang mit der Atomaustiegsdebatte

hat der Akzeptanz dieser Technologie in Kreisen der Elektrizitätswirtschaft eher geschadet.

- Die **grossen technischen Probleme** bei der Gütsch-Anlage sind ein Rückschlag für die an diesem Projekt engagierten Schweizer Firmen *ABB, Technocon, Bartholdi*.

AUSBLICK 2004

Im Jahr 2004 wird mit einer **Verdoppelung der installierten Windenergieleistung** gerechnet: Die bisherige Gesamtleistung aus Windenergie von 5.3 MW soll um 4.4 MW aufgestockt werden. Geplant sind ein Ausbau des Windparks auf dem Mont-Crosin um zwei Windturbinen von je 1.75 MW sowie eine 0.9 MW-Anlage am neuen Standort in Entlebuch-Feldmoos. Ausserdem wird der **Entscheid des Verwaltungsgerichts des Kantons Neuenburgs** in Bezug auf die Rekurse gegen den geplanten Windpark Crêt-Meuron auf der Vue-des-Alpes erwartet. In der ersten Jahreshälfte soll zudem das **Konzept Windenergie Schweiz** verabschiedet werden, das neben Standortkriterien für den Bau von Windenergieanlagen auch die am besten geeigneten Standorte in der Schweiz auflistet. Von diesem Konzept erhofft sich die Branche insbesondere bezüglich der Einsprachenpraxis eine Verkürzung von Planung und Bau neuer Anlagen.

Projekte im Bereich Auswirkungen / Akzeptanz

Als Ergänzung und Weiterentwicklung des *Nationalen Konzept Windenergie* soll untersucht werden, welche Auswirkungen die Installation und der Betrieb von Windkraftanlagen verursachen, und wie die Akzeptanz dieser Projekte gefördert werden kann:

- **Vorher / Nachher Studie Entlebuch**
- **Akzeptanz-Untersuchung Chur**

Projekte im Bereich Technologie Transfer und Entwicklung

- Weiterentwicklung der **Leichtwindanlage AV-7** der Firma Aventa im Hinblick auf grösseren Energieertrag, geringere Stromgestehungskosten und neue Absatzmöglichkeiten.
- Dynamischer Test an einem **intelligenten Rotorblatt**
- Rotorblätter mit **nano strukturierten Beschichtungen**

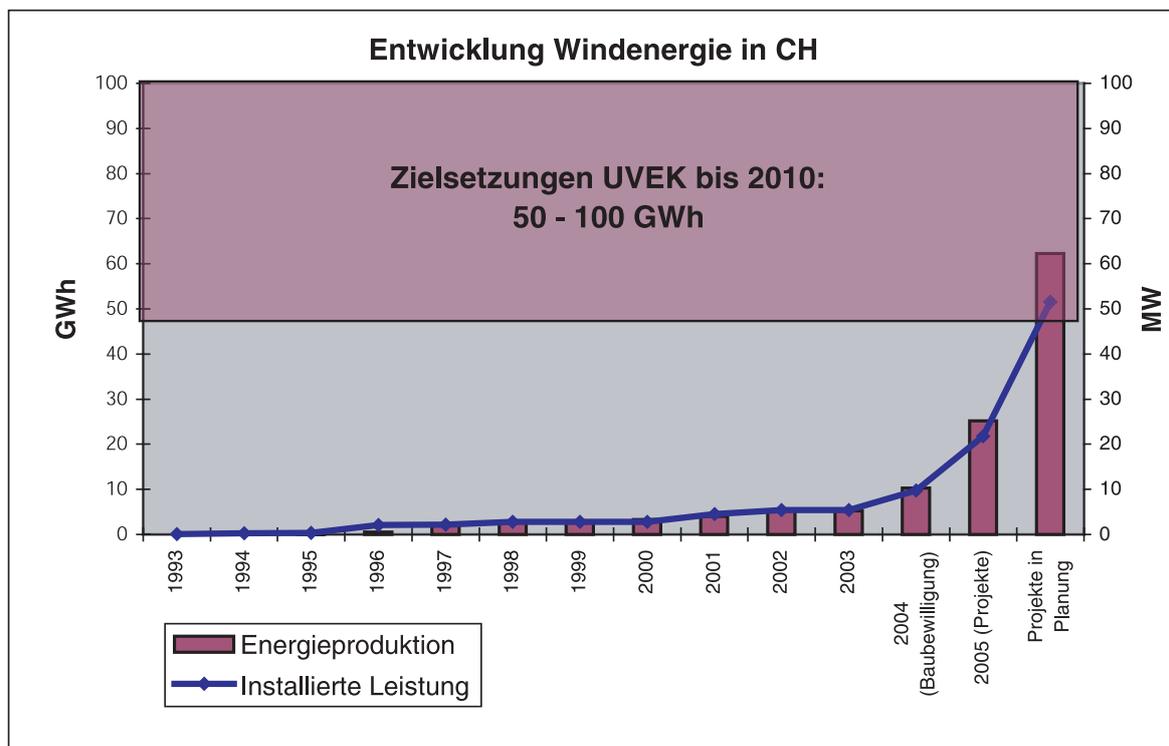
Internationale Aktivitäten

- Die Teilnahme am IEA-Projekt **Base Technology Information Exchange** ist zu klären. Es sind Experten-Meetings zu den für die Schweiz relevanten Themen geplant: Soziokulturelle Faktoren der Windenergie (Landschaftsschutz, Tourismus, Umwelt); *Advanced Wind sensing Techniques* (SODAR, Satellites); *Integration of Wind Energy and Hydropower*.
- Die Arbeiten im Rahmen des Annex XIX (**WECO**) dauern sicher noch bis Ende 2004, wobei sich abzeichnet, dass die Arbeiten weitergeführt werden sollen, vor allem in Richtung Eisdetektoren. Es ist zu klären, ob ein Interesse

von Schweizer Unternehmen an der direkten Teilnahme am *IEA Wind R&D Implementing Agreement* besteht.

Mittel- und langfristige Entwicklung der Windenergie in der Schweiz

Aufgrund der aktuell vorliegenden Baubewilligungen erhöht sich die installierte Leistung der Windenergieanlagen im Jahre 2004 um 4.4 MW. Projekte mit hoher Realisierungschancen für 2005 führen zu weiteren 12 MW. Mit der Realisierung aller heute in Planung begriffenen Windenergieprojekte könnten die Ziele des UVEK erreicht werden.



Figur 7: Mittelfristige Entwicklung der Elektrizitätsproduktion aus Windenergie in der Schweiz

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2003 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden

- [1] Michel Voisard, et.al. (mediactif@bluewin.ch, <http://mediactif.ch/>) MEDIACTIF, Vevey: **Réceptivité des ménages au développement des sites éoliens; Rapport d'enquête** (SB) ENET 220338
- [2] Sigrid Albrecht, Studentin der Rechtswissenschaft, Universität Zürich: **Rechtliches Regime der Windenergie** (SB) ENET 220266
- [3] Stefan Kunz, René Cattin (kunz@meteotest.ch, www.meteotest.ch) METEOTEST, Bern,: **a) Unterhalt Winddatenbank 2003** (SB) ♦ **b) Windmessung Crap Sogn Gion; Abschätzung des Windpotenzials** (SB) ENET 230079 ♦ **c) Windenergiekonferenz BOREAS** (SB) ♦ **d) Produktion Vernehmlassungsunterlagen Konzept Windenergie Schweiz** (JB) ♦ **e) Konzept Windenergie Schweiz** (JB)
- [4] B.Droz Yvan; Miéville-Ott Valérie; Monsutti Alessandro, RECHERCHES & CONSEILS ANTHROPOLOGIQUES, La Sagne: **Auswertung Publikumsbefragung Wind / Du vent dans les pales; Expériences et perceptions des éoliennes par les habitants de la région du Mont-Crosin** (SB) ENET 230094
- [5] Robert Horbaty (horbaty@suisse-eole.ch www.suisse-eole.ch) SUISSE EOLE, Niederdorf: **a) Alpine Wind Harvest** (www.sbg.ac.at/pol/windharvest/) (JB) ♦ **b) Sicherheitsrichtlinien für Windenergieanlagen in der Schweiz** (JB)
- [6] Martin Märki (arbastrom@bluewin.ch, www.arbastrom.ch/) ARBASTROM, Winterthur: **Umfrage Windenergie bei SAC-Hütten** (SB)
- [7] Petra Borch et.al. (info@vogelwarte.ch, www.vogelwarte.ch/) SCHWEIZERISCHE VOGELWARTE, Sempach: **Windenergiekonzept Schweiz – Beurteilung der 40 prioritären Standorte aus ornithologischer Sicht** (SB)
- [8] Ueli Spalinger (aventa@energienetz.ch, www.aventa.ch) ARGE AVENTA, Winterthur: **a) Standortklärung und Messung Leichtwindanlage** (SB) ENET 220235; ♦ **b) Nutzung der Windenergie im Kanton Graubünden** (SB) ENET 230001, ♦ **c) Marktstudie Aventa Leichtwindanlagen** (JB)
- [9] Michel Zabelka (mzabelka@access.ch), OEKOPLAN, Zürich: **Standortabklärungen Aroser Weisshorn** (SB)
- [10] Thomas Weisskopf (weisskopf.thomas@bluewin.ch, www.weisskopf-partner.ch) WEISSKOPF PARTNERS, Zürich: **Windenergiestandorte Flims-Laax; Machbarkeitsstudie** (SB) ENET 230038
- [11] Rina Caduff (info@aurax.ch, www.aurax.ch) AURAX ENERGIA AG, Illanz: **Windmessungen Crap Sogn Gion mit Sodar und 10m Mast** (SB)
- [12] Jürg Berchtold (j.berchtold@ewd.ch, www.ewd.ch) EWD ELEKTRIZITÄTSWERK DAVOS AG, Davos: **Machbarkeitsstudie für Windenergienutzung in Davos** (JB)
- [13] N. Wüthrich (wch@zhwin.ch) GENSOL MARTELLA, Marthalen: **Erstellen einer Leichtwindanlage auf dem Siloturm der Landi Marthalen** (SB)
- [14] ANTON MARTI, Rüttenen: **Leichtwindanlage Rüttenen** (SB)
- [15] Markus Russi (ew-ursern@bluewin.ch, www.ew-ursern.ch) ELEKTRIZITÄTSWERK URSERN, Andermatt: **800-kW-WKA Gütsch** (JB)

Liste der P+D-Projekte

- [16] Jakob Kubli (jakob.kubli@gl.ch) BAUDIREKTION KT. GL, *Glarus*: **Windmessung in der Linthebene** (SB) ENET 230164
- [17] Eric Nussbaumer (info@adev.ch, www.adev.ch) ADEV, *Liestal*: **a) Les Bréleux** (JB) ♦ **b) Saint-Brais** (JB)
- [18] Christian Müller-Schöll (christian.mueller-schoell@forum21.ch), FORUM 21, *Illnau-Effretikon*: **Windmessung in Illnau Effretikon** (SB)
- [19] Jürg Lehmann, Schwengimatt, *Balsthal*: **Windmessungen Schwengimatt** (SB)
- [20] Hervé Nussbaumer KOHLENUSBAUMER, *Delémont*: **Windmessungen Les Bois / Le Peuchapatte JU** (Projekt nicht begonnen, keine Aktivitäten -->Abbruch)
- [21] Ch. Kapp (info@nek.ch, www.nek.ch) NEK UMWELTECHNIK AG, *Zürich*: **Projektrelevante Studien und Abklärungen im Zusammenhang mit einem Windenergieprojekt auf dem Gotthardpass** (JB)
- [22] Josias Gasser, BAUMAERIALIEN AG, *Chur*: **Bau und Erfolgskontrolle Windkraftanlage Haldenstein Chur** (Projekt nicht begonnen, keine Aktivitäten -->Abbruch)

Referenzen

- [23] UBS (Lux) Equity Funds – Eco Performance: **Damit die Zukunft eine Zukunft hat.** www.ubs.com/pdf-quotes-investmentfunds/eco_imagebr_g.pdf
- [24] Energie-Forum Schweiz, Medienmitteilung Woche 4/04: **Windstrom: Zubau verlangsamt sich** www.energie-energy.ch/home.php4?sL=report&Lg=dt
- [25] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2000 – 2003**, ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE www.energie-schweiz.ch/internet/03095/index.html?lang=de
- [26] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007**, ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, www.energie-schweiz.ch/internet/03095/index.html?lang=de
- [27] EPFL, **Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**, Laboratoire des systèmes énergétiques LASEN, <http://lasen.epfl.ch/page39406.html>
- [28] 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>
- [29] **Hochschule für Technik und Wirtschaft**, Chur. [http://www.fh-htwchur.ch/files/newsletters/7Newsletter HTW Chur fuer oktober 2002NEU.pdf](http://www.fh-htwchur.ch/files/newsletters/7Newsletter%20HTW%20Chur%20fuer%20oktober%202002NEU.pdf)
- [30] **Schweizerische Vereinigung für Windenergie, Suisse Eole**: www.suisse-eole.ch
- [31] **Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz AEE**: www.aee.ch
- [32] **Verein für umweltgerechte Elektrizität (VUE)**: www.naturemade.org
- [33] IEA-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development, Annex XIX **Wind Energy in Cold Climates**. <http://arcticwind.vtt.fi/>
- [34] René Cattin, Beat Schaffner, Dr. Stefan Kunz and Robert Horbaty: **Wind measurements and modelling in the Swiss alps**, Referat anlässlich der BOREAS-Windenergiekonferenz in Finnland, 9./10.4.2003.
- [35] **Deutschen Windenergie Institut DEWI**: www.dewi.de
- [36] **Statusreport WECO** (Wind energy in cold climates) http://arcticwind.vtt.fi/reports/state_of_the_art.pdf

NUKLEARE SICHERHEIT UND ENTSORGUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Konstantin Foskolos

konstantin.foskolos@psi.ch



Reaktorphysikalische Experimente am PROTEUS

Deborierungs-Vorgang am Druckwasser-Reaktor-Mockup. Mit den Experimenten wurde der Einfluss verschiedener Moderationsverhältnisse auf die abbrandbedingte Reaktivitätsabnahme im nuklearen Brennstoff untersucht.

Generelle 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.

Das NES-Leitbild umfasst daher folgende Hauptpunkte:

- Beiträge zum sicheren und wettbewerbsfähigen Betrieb heutiger KKW und Sicherheitsnachweise für Endlager durch Verstärkung der wissenschaftlichen Basis in den entsprechenden Gebieten.
- Unterstützung der KKW-Betreiber und der Aufsichtsbehörde und Sicherstellung einer Standby-Funktion in Schlüsselgebieten; Bereitstellung von Input für strategische energiepolitische Entscheidungsfindungen

- Offenhaltung der Option *Kernenergie* durch F&E in Richtung eines höheren Nachhaltigkeitsgrades, einschliesslich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit
- Bereitstellung eines breiten Spektrums an F&E-Möglichkeiten für die Ausbildung junger Kerntechnik-Spezialisten.

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 nach dem Verwerfen der zwei Ausstiegsinitiativen im Mai 2003, der Betrieb der Schweizer KKW bis zu 60 Jahren verlängert werden könnte, dass heutige Reaktoren durch neue, mit den Nachhaltigkeitsgebieten noch kompatible ersetzt werden könnten, und dass ein Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle in der Schweiz gebaut werden soll. Das neue, Anfang 2005 zu implementierende Atomgesetz setzt ein 10jähriges Moratorium auf die Wiederaufarbeitung von abgebranntem Brennstoff und verlangt ein Referendum auf Bundesebene für den Bau neuer Atomanlagen. Unter diesen Bedingungen sind höhere Flexibilität und Robustheit erforderlich. Dies wird durch Forschung auf generischen Gebieten, durch Verstärkung der Vernetzung innerhalb des PSI und durch Aufnahme einer neuen Hauptaktivität im Rahmen internationaler Zusammenarbeiten angestrebt. Die Bedingungen für letztere wurden durch die Aufnahme der Schweiz im Generation IV International Forum (GIF) geschaffen.

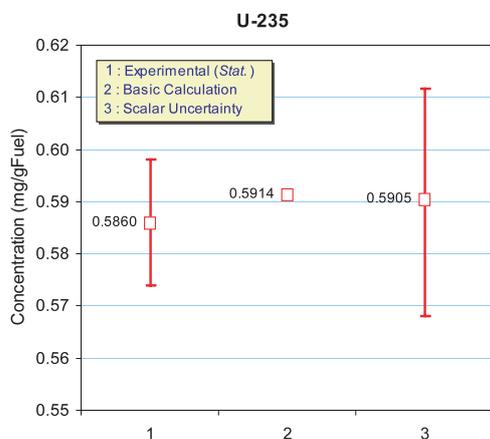
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

Die Arbeiten des NES sind 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

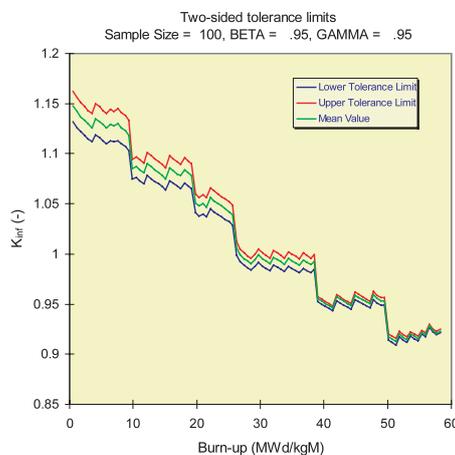
STARS [1] (*Sicherheitsexpertise und -forschung bezüglich Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz*): Das Projekt findet in enger Zusammenarbeit und mit Unterstützung der HSK statt. Im Berichtsjahr führten auf reaktorphysikalische Studien angewandte Unsi-

cherheitsanalysen zur Entwicklung und Anwendung einer neuartigen statistischen Methodik für Berechnungen des Brennstoffabbrandes. Die Methodik basiert auf einem Ansatz, in welchem die Unsicherheit der Codeeingaben und der Modellvariablen als stochastische Größen behandelt werden; diese generieren nach deterministischer Anwendung im Code Ergebniswerte, die wiederum als Zufallsvariablen behandelt und analysiert werden können. Statistische Stichproben-Techniken werden dann genutzt, um eine Reihe von Coderechnungen mit zufällig gewählten Kombinationen von Inputwerten und Abbrandvariablen laufen zu lassen, die eine Stichprobe von Outputwerten im Interessenbereich produzieren. Die notwendige Anzahl von Codedurchgängen (Grösse der statistischen Stichprobe) zum Erhalt von Toleranzintervallen mit einem gegebenen Wahrscheinlichkeitsgehalt und Vertrauensniveau wird durch Anwendung der Wilk'schen Formel (nichtparametrische Statistik) bestimmt. Die Intervalle messen die Unsicherheit in den Codevorausagen: Sie geben obere und untere Grenzwerte an, welche einen gegebenen Anteil (z. B. 95%) aller möglichen Ergebniswerte umschliessen, die aus Unsicherheiten in den Eingabewerten resultieren können, und geben ein Vertrauensniveau (z. B. 95%) für diese Aussage an. Im Fall der Berechnung des Brennstoffabbrandes propagiert die Methodik die Unsicherheiten in den Variablen, die den Brennstoff und seine Abbrandbedingungen beschreiben, zu den Nuklidkonzentrationen als Funktion des Abbrandes. Zusätzliche statistische Sensitivitätsanalysen, auch Teil der Methodik, helfen dazu, jene Inputvariablen zu identifizieren, deren Unsicherheiten am meisten zur Streuung der Berechnungsergebnisse zur Messzeit oder als Funktion des Abbrandes beitragen.



Figur 1a: Zweiseitiges 95%-95% Toleranzintervall zur Messzeit für die ^{235}U -Konzentration in der MOX-Probe BM5

Eine erste Studie der Propagierung von Unsicherheiten wurde mit dem Ziel durchgeführt, die Unsicherheiten in den berechneten Nuklidzusammensetzungen von MOX Brennstoffproben zu quantifizieren und diese mit den experimentellen Unsicherheiten zu vergleichen. Dazu wurden Isotopeninventare hochbestrahlter Brennstoffproben aus dem ARIANE-Programm genutzt, um die Genauigkeit des 2-D Codes CASMO-4 bei der Berechnung von Nuklidkonzentrationen in Hochabbrand-MOX-Brennstoff zu bewerten. ARIANE lieferte auch die notwendigen experimentellen Daten und die Messunsicherheiten. Es wurde ein Brennstabzellen-Modell mit sieben radialen Brennstoffzonen angewandt, für welches eine detaillierte Bestrahlungsgeschichte aufgrund der Leistungsdichte in der Probe, der Kühlmittel- und Brennstofftemperaturen, des Borgehaltes und der Zykluslänge generiert wurde. Die auf JEF2.2 basierende Wirkungsquerschnittsbibliothek in 70 Gruppen lieferte neutronische Daten. Die Methodik lieferte quantitative Unsicherheitsabschätzungen in der Form von zweiseitigen Toleranzintervallen sowie von Mittelwerten für die isotopischen Gehalte und andere Neutronikparameter in Funktion des Abbrandes. Sie produzierte auch Toleranzintervalle für mittlere Abschätzungen der isotopischen Zusammensetzung am Zeitpunkt der Messung (skalare Unsicherheit). Figur 1a zeigt ein Beispiel der Konzentration von ^{235}U . Die experimentelle Messung im Labor des SCK-CEN mit einer statistischen Unsicherheitsbreite von $2\text{-}\sigma$ wird verglichen mit der nominalen Voraussage von CASMO-4 und dem 95%-95% zweiseitigen Toleranzintervall um den Mittelwert, der aus den 100 CASMO-4 Berechnungen resultiert. Als Beispiel der Unsicherheitsabschätzungen für andere Neutronikparameter, zeigt Figur 1b Resultate aus CASMO-4 für das k_{inf} .



Figur 1b: Zweiseitiges 95%-95% Toleranzintervall in Funktion des Abbrandes für das k_{inf} des Brennelementes mit der Probe BM5

Human Reliability Analysis (HRA): Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit und mit Unterstützung der HSK durchgeführt. Die Analyse der Entscheidungsfindung beim Personal ist eine zentrale Frage bei der Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit (Human Reliability Analysis) im Rahmen probabilistischer Sicherheitsstudien. Diese Frage wird noch wichtiger bei der Betrachtung von Szenarien, welche Kommissionsfehler beinhalten, dies aus zwei Gründen: Erstens, sind die Lagebewertung und die Auswahl der Reaktion Schlüsselemente in vielen dieser Szenarien. Sie umfassen, z. B. die Missinterpretation der Information aus der Anlage, die Auswahl einer Reaktion, die für die Lage inadäquat ist, oder eine Kombination dieser beiden Elemente. Zweitens ist es wahrscheinlich, dass ein entscheidungsbezogener Fehler Einfluss auf die Ausführung nachfolgender Aktionen haben wird. Die Erforschung der HRA-Methodik konzentriert sich folglich auf der Quantifizierung der Leistungsfähigkeit bei der Entscheidungsfindung.

Eine grosse Anzahl von Faktoren beeinflusst die menschliche Leistung bei der Entscheidungsfindung; gleichzeitig kann die Leistung je nach Lagekontext sehr empfindlich gegenüber einem oder zwei Faktoren sein. Um diese Faktoren anzugehen, basieren die vorhandenen HRA-Methoden stark auf Expertenbeurteilung. Zur Reduktion der damit gekoppelten Unsicherheiten besteht ein möglicher Ansatz darin, die Experten mit Referenzfällen zu unterstützen. Jeder Fall bezieht sich auf eine spezifische Aufgabe in einem spezifischen Szenario mit Abschätzung der Wahrscheinlichkeit. Der Experte würde dann beim Beurteilungsvorgang die Referenzfälle nutzen, um die qualitative Analyse sowie die abgeschätzten Wahrscheinlichkeiten zu unterstützen.

Im Berichtsjahr wurde eine strukturierte Methodik für die qualitative Analyse definiert und auf 25 betriebliche Ereignisse aus der internationalen Erfahrung angewandt. Die Methodik charakterisiert das Ereignis, indem sie das Risiko und die abschwächenden Faktoren sowie ihre Beziehung zu Schlüsselaspekten der Lage untersucht: Zeitdruck, Verifizierungsaufwand, erwarteter Nutzen, Schadenspotenzial und Personalredundanz. Die Anwendung zeigte, dass ein breiter Bereich von Ereignissen systematisch analysiert werden konnte. In Zusammenhang mit der Quantifizierung kann also diese strukturierte Beschreibung genutzt werden, um eine gegebene Situation mit einer Referenzsituation zu vergleichen sowie um die Wahrscheinlichkeitsabschätzung zu berichtigen. Die laufende Forschung zielt darauf, die Zuverlässigkeit dieser Quantifizierungsmethode

zu evaluieren und zu erhöhen und Werte für die Wahrscheinlichkeitsabschätzungen der Referenzfälle zu bestimmen.

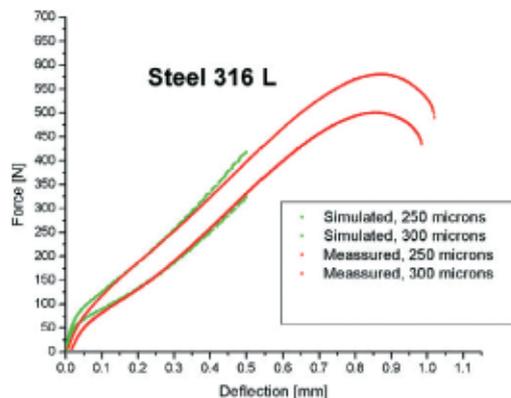
LWR-PROTEUS [3]: Das Projekt findet mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW statt. Im Berichtsjahr wurden die zur Phase II des Projektes LWR-PROTEUS gehörenden reaktorphysikalischen Experimente abgeschlossen. Ihr Ziel war die Validierung der abbrandbedingten Reduktion der Neutronenmultiplikation (Reaktivitätsverlust) und der Zunahme der Neutronenemission im nuklearen Brennstoff. Wie lange abgebrannter Brennstoff noch im Reaktorkern verbleiben kann, hängt von der Kernreaktivität ab. Die genaue Kenntnis dieser Grösse bestimmt folglich die Zykluslänge des Kernes und die Brennstoffausnutzung.

Im Jahr 2003 wurde ein zusätzlicher Neutronenmoderations-Fall untersucht, nämlich mit zu 2000 ppm borierter Wasser, was für DWR-Bedingungen beim kalten Zyklusbeginn repräsentativ ist. Dieser Fall vervollständigte vorherige Moderationsbedingungen (sauberes Wasser sowie Mischung von leichtem und schwerem Wasser, letztere um das Moderationsverhältnis bei voller Leistung zu simulieren). Zusätzlich wurden zwei Proben aus extrem abgebranntem DWR-Brennstoff (MOX mit ~63 GWd/t und UO₂ mit ~105 GWd/t aus Gösgen) sowie zwei UO₂ SWR-Proben (~36 und ~59 GWd/t aus Leibstadt) untersucht, im Sinne einer Erweiterung der zuvor untersuchten abgebrannten Brennstoffproben. Der breite Bereich an Abbrandniveaus und Neutronenmoderations-Bedingungen bildet somit eine einzigartige experimentelle Datenbasis.

Parallel wurden experimentelle Studien an der SINQ und am PROTEUS durchgeführt, um das Spektrum der von diesen abgebrannten Brennstoffsegmenten emittierten Photonen zu bestimmen. Ziel war die weitere Charakterisierung des Brennstoffes im Rahmen einer Doktorarbeit und die Entwicklung und Optimierung neuer experimenteller Techniken, die für zukünftige, zerstörungsfreie Untersuchungen relativ grosser Anordnungen von abgebrannten Brennstoffstäben genutzt werden können.

EDEN [4] (Entwicklung, Demonstration und Evaluation von Nachbetriebs-Untersuchungen): Das Projekt findet in enger Zusammenarbeit und mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW statt. Hüllrohre von Brennstäben sind während des Betriebs einer Vielzahl von Belastungen ausgesetzt, die zur Beeinträchtigung ihrer mechanischen Eigenschaften, besonders der Zähigkeit führen. Die Verminderung der

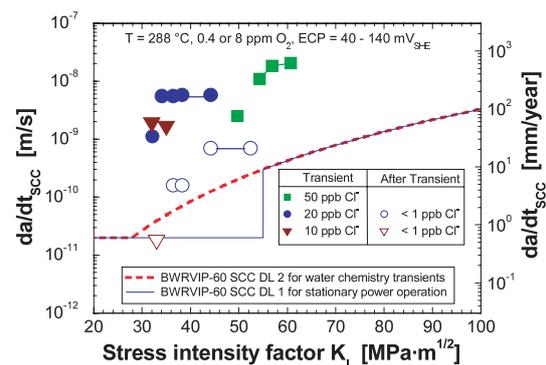
Zähigkeit wird einerseits durch Hydrierung des Materials verursacht, andererseits durch Strahlungsversprödung. Die Untersuchung der Strahlungsversprödung in Abhängigkeit vom Abbrand ist Thema einer im Rahmen des Projekts EDEN laufenden wissenschaftlichen Untersuchung. Die Bestimmung des Spannungs-Dehnungsverhaltens von dünnwandigen, aktiven und kontaminierten Hüllrohren ist dabei von zentraler Bedeutung. Wegen des Werkstoffzustands müssen die Festigkeitseigenschaften mit sehr kleinen Proben ermittelt werden. Der sogenannte Punctest, bei welchem eine kleine Kugelkalotte kontrolliert in ein dünnes Plättchen gepresst wird, während Kraft und Verschiebung aufgezeichnet werden, ist dazu prinzipiell gut geeignet. Eine quantitative Aussage über die Fließspannung ist aber nur möglich, wenn ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der im Punctest ermittelten Kraft-Verschiebungskurve und der wahren Spannungs-Dehnungskurve des Materials vorliegt. Dieser Zusammenhang wurde nach der Methode der Finiten Elemente bestimmt. Die Figur 2 zeigt einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten, wobei eine sehr gute Übereinstimmung erreicht werden konnte. Damit ist es nun möglich mit kleinen Proben den Einfluss der Bestrahlung auf die Festigkeitseigenschaften von dünnwandigen Hüllrohren quantitativ zu untersuchen.



Figur 2: Vergleich von im Punctest ermittelten Kraft-Verschiebungskurven (bis 1 mm) mit aus einseitigem Zugversuch mit Finiten Elementen berechneten Kurven (bis ca. 0.6 mm Deflection)

INTEGER [5] (Bauteilsicherheit): Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit und mit finanzieller Unterstützung der HSK durchgeführt und ist gut im 5. EU-Rahmenprogramm eingebettet. Der Reaktordruckbehälter (RDB) von SWR ist hinsichtlich Sicherheit und Anlagenlebensdauer die kritischste druckführende Komponente. Die möglichen Auswirkungen der Spannungsrissskorrosion

(SpRK) auf die Strukturintegrität des RDB stellt daher in diesem Zusammenhang weiterhin eine Schlüsselfrage dar. Am PSI wurde deshalb das SpRK-Risswachstumsverhalten niedriglegierter RDB-Stähle unter stationären SWR-Bedingungen, die den grössten Teil der Lebensdauer abdecken, im Rahmen des RIKORR-I-Projektes evaluiert. Diese Untersuchungen offenbarten eine sehr niedrige Anfälligkeit für SpRK-Risswachstum unter stationären Betriebsbedingungen und führten zur Definition der BWRVIP-60 Grenzkurven für das SpRK-Risswachstum in niedriglegierten RDB-Stählen (Figur 3). Das SpRK-Verhalten während und nach Wasserchemietransienten ist aber auch von praktischer Relevanz, da der SWR-Betrieb unvermeidlich auch kurzfristige Änderungen der Wasserchemie und des Sauerstoffgehalts umfasst. Leitfähigkeits- und Sauerstofftransienten treten beispielsweise während des Anfahrens und Abschaltens und manchmal auch während des stationären Leistungsbetriebs auf (Einbrüche von Ionenaustauscherharzen, Kondensatorleckagen, etc.).



Figur 3: Vergleich der BWRVIP-60 Dispositionslinien mit SpRK-Risswachstumsraten in verschiedenen RDB Stählen während und nach Chloridtransienten unter simulierten SWR-Bedingungen

Daher wurde die Eignung der BWRVIP-60 Grenzkurven 2 und 1 während und nach Sulfat- und Chloridtransienten im Bereich der verschiedenen Action Levels der EPRI-SWR-Wasserchemierichtlinie untersucht und bewertet. Sulfattransienten deutlich oberhalb des EPRI Action Level Grenzwerts 3, wo ein unmittelbares Abschalten des Reaktors empfohlen wird, führten zu keiner Beschleunigung des SpRK-Risswachstums, und die Risswachstumsraten (RWR) während und nach den Sulfattransienten wurden durch die BWRVIP-60 Grenzkurven konservativ abgedeckt. Die Zugabe von 10 ppb (> EPRI Action Level Grenzwert 1) bis 50 ppb Chlorid führte zu einer Beschleunigung der RWR in allen untersuchten RDB-Stählen um mindestens eine Grössenordnung und zu

schnellem, stationären SpRK-Risswachstum mit RWR oberhalb der BWRVIP-60 Grenzkurve 2 für Wasserchemietransienten (Figur 3) In mehreren Fällen wurde zudem nach der Rückkehr zu höchst-reinem Wasser (< 1 ppb Chlorid) nach schweren und lang anhaltenden Chlorid-Transienten ($>$ EPRI Action Level Grenzwert 2) über sehr lange Zeiträume von mindestens 1000 Stunden schnelles und lang anhaltendes SpRK-Risswachstum mit RWR deutlich oberhalb der BWRVIP-60 SpRK-Grenzkurve 2 beobachtet. Chloridtransienten oberhalb des EPRI Action Level Grenzwertes 1 sowie deren Zeitdauer und Ausmass sollten deshalb durch geeignete Massnahmen im Reaktorbetrieb so weit als möglich vermieden werden. Zusätzlich sollte der Chloridgehalt im Reaktorwasser und Chloridtransienten sorgfältig überwacht und bewertet werden.

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. Trotz Verbesserungen in der Auslegung, Herstellung und Betrieb von Dampferzeugern (DE) weltweit, treten gelegentlich beim Betrieb von DWR Fälle von DE-Rohrbrüchen (DERB) auf, welche die Notwendigkeit einer erhöhten Aufmerksamkeit für diese Frage unterstreichen.

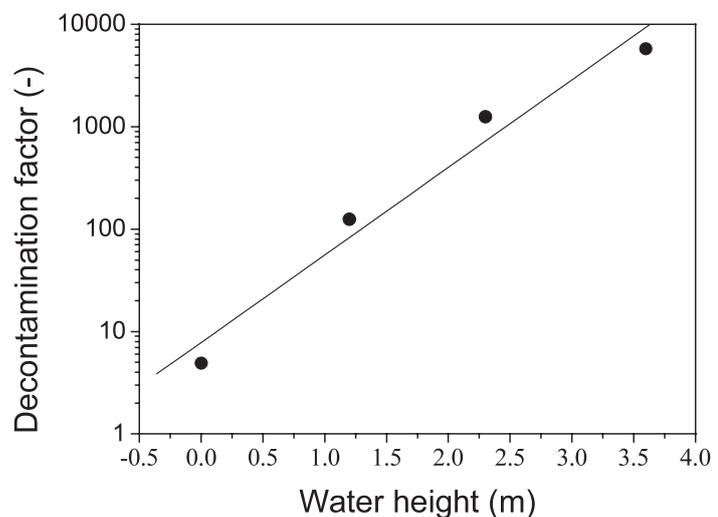
Eine besondere sicherheitsbezogene Herausforderung stellt ein DERB kombiniert mit anderen Fehlfunktionen, die zu einem Kernschmelzen führen könnten; in diesen Fällen könnte ein direkter Pfad entstehen, auf welchem die radioaktiven Spaltprodukte in die Umwelt gelangen könnten.

Trotz ihrer kleinen Wahrscheinlichkeit, stellen diese so genannten Containment-Bypass Sequenzen einen signifikanten oder gar dominanten Beitrag zum Gesamtrisiko für die Bevölkerung dar. Obwohl probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) die Rückhaltung von Spaltprodukten in der Sekundärseite typischerweise nicht berücksichtigen, stellt die komplizierte DE-Geometrie eine grosse Fläche dar, auf welcher die Spaltprodukte zurückgehalten werden könnten. Das Vorhandensein von flüssigem Wasser im DE-Rohrbündel könnte die Rückhaltung noch weiter steigern. Dennoch sind die Vorgänge, welche die Rückhaltung steuern, komplex, und es existieren keine zuverlässigen Modelle oder empirische Daten, die eine Bewertung zulassen.

Um die mit der Freisetzung von Spaltprodukten nach einer DERB-Sequenz gekoppelten Unsicherheiten reduzieren zu helfen, wurde das experimentelle Programm ARTIST (Aerosol Trapping in a Stream Generator) zusammen mit einem Dutzend internationaler und nationaler Organisationen implementiert, mit dem Ziel die Strömung und die Rückhaltung von Spaltprodukten in Aerosolform im DE zu simulieren und so eine einzigartige Datenbasis zur Unterstützung von Sicherheitsbewertungen und analytischen Modellen zu liefern. Im Projekt SGTR innerhalb des 5. EU-Rahmenprogrammes wurden erste Tests in der ARTIST Anlage für trockene und voll oder teilweise geflutete Bündel durchgeführt. Wie aus Figur 4a ersichtlich lagern sich Aerosol-Partikel (weisse Schicht) überall auf den DE-Flächen ab. Eine Flutung des Bündels höher als 2 bis 3 m oberhalb der Bruchstelle (Figur 4b) führt praktisch zu einer



Figur 4a ARTIST Bündel nach einem trockenen Test



Figur 4b Aerosolrückhaltung in Wasservorlagen als Funktion der Wasserhöhe oberhalb des Bruches

totalen Rückhaltung der Aerosolpartikel unter erwarteten Bedingungen eines schweren Unfalls. Ein vertieftes Verständnis der Aerosolfreisetzungsvorgänge im Rahmen des internationalen ARTIST-Projektes (2003-2007) wird dazu genutzt, um die Aerosolrückhaltung in verschiedenen Komponenten eines DE zu modellieren und um präzise Anforderungen für Accident Management Aktionen zu liefern.

Entsorgung Radioaktiver Abfälle [7]: Die F&E zur Entsorgung radioaktiver Abfälle am PSI spielt eine wichtige nationale Rolle bei der Unterstützung des Bundes und der Nagra bei ihrer Aufgabe, nukleare Abfälle aus Anwendungen in der Medizin, der Industrie und der Forschung als auch solche aus den schweizerischen Kernkraftwerken sicher zu entsorgen. Die Arbeiten umfassen Aktivitäten in fundamentaler Endlagerchemie, in Chemie und Physik der Radionuklide an der Grenzfläche von Flüssig-/Festphasen und als feste Lösungen, und im Radionuklidtransport unter Berücksichtigung der Rückhaltung in geologischen Medien und künstliche Endlagerbarrieren. Die Arbeit kombiniert in ausgewogener Weise experimentelle Aktivitäten in dedizierten radioaktiven Labors, in Grossanlagen wie Synchrotrons und die SINQ und im Feld sowie theoretische Modellierung. Die Anstrengungen orientieren sich auf Endlager-Projekte, und die Resultate finden direkte Anwendung in umfassenden Sicherheitsnachweisen, die von der Nagra durchgeführt werden. Bemerkenswert ist auch die starke Zusammenarbeit mit ausländischen Institutionen im Rahmen internationaler Forschungsprojekte sowie auf bilateraler Basis.

Die Arbeiten im Jahr 2003 wurde dominiert von der Fertigstellung und Veröffentlichung der PSI-Referenzberichte für das Nagra-Projekt Opalinuston, und, spezifischer, für den Entsorgungsnachweis für abgebrannten Brennstoff, verglaste hochaktive Abfälle und langlebige mittelaktive Abfälle im Opalinuston des Zürcher Weinlandes. Diese Berichte beziehen sich auf

- Glaskorrosionsraten für COGEMA und BNFL Gläser;
- Zusammensetzung des Referenz-Porenwassers im Bentonit;
- Löslichkeitslimiten im Nahfeld für abgebrannten Brennstoff und verglaste hochaktive Abfälle;
- Löslichkeiten im zementhaltigen Umfeld im Endlager für mittelaktive Abfälle;
- Sorption auf MX-80 Bentonit;
- Sorption auf zementhaltigen Materialien im Endlager für mittelaktive Abfälle;

- Sorption auf gestörtem/verändertem Opalinuston in der Nähe des Endlagers für mittelaktive Abfälle;
- Die Auswirkungen von Vergletscherung und Tunnelkonvergenz auf Strömung und Radionuklidtransport;
- Labor- und Feldexperimente zur Diffusion im Opalinuston (derzeit in internationaler Review).

Diese Berichte fassen die Essenz der PSI-Forschung auf diesem Gebiet in den vergangenen Jahren zusammen und präsentieren die Eingabedaten für den Sicherheitsnachweis in transparenter und nachvollziehbarer Weise. Die Methodik zur Datenevaluation für den Sicherheitsnachweis ist weitgehend neuartig. Die Hauptauswirkung ist, dass – nach Versagen der Abfallkanister – der bedeutendste Teil der austretenden Radioaktivität im Nahfeld des Endlagers immobilisiert bleibt. Die PSI-Arbeiten haben also wesentlich zum Nachweis beigetragen, dass ein Endlager im Opalinuston des Zürcher Weinlandes die Sicherheitskriterien erfüllen kann. Aufgabe zukünftiger Arbeiten wird sein, diese Erkenntnisse auf noch breiterer wissenschaftlicher Basis zu stützen.

SICHERHEITSBEZOGENE MERKMALE ZUKÜNFTIGER REAKTORKONZEPTE

Fortgeschrittene Brennstoffzyklen [8]: Das per Ende 2003 abgeschlossene Projekt fand mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW und der ausländischen Brennstoffindustrie statt. Am 27 August 2003 verliess ein mit 14 Fässern beladener Schwertransporter das PSI-Hotlabor. Die Fässer enthielten insgesamt 16 Brennstoffsegmente zur Bestrahlung am Hochflussreaktor (HFR) in Petten (NL) im Rahmen des FUJI Projektes. Dieser Transport kennzeichnete das erfolgreiche Ende der Brennstoffsegment-Herstellung, die fast 10 Jahre zuvor in Angriff genommen wurde.

Diese Zusammenarbeit zwischen dem Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC), dem PSI und dem Nuclear Research and Consultancy Group (NRG), befasst sich insbesondere mit der Restrukturierung am Bestrahlungsanfang von zwei Typen von Partikelbrennstoff, Sphere-pac und Vipac, im Vergleich zum Tabletten-Brennstoff. Drei Typen von am PSI hergestelltem Brennstoff werden im HFR unter gleichen Bedingungen bestrahlt. Dafür wurde MOX-Brennstoff mit 20% Pu und einem Sauerstoff-zu-Metall Verhältnis von 1.97 (typisch für Brennstoff für schnelle Reaktoren) in den drei unterschiedlichen Formen hergestellt; für zwei Stäbe wurden hinzu Np-haltige

MOX-Kügelchen produziert. Die Fabrikation der Kügelchen basierte auf dem bekannten Verfahren der internen Gelierung mit Nitratlösungen als Ausgangsmaterial. Die Tabletten-Fabrikation basierte auf der Prozedur, die bereits zur Herstellung von IMF- und MOX-Tabletten zur Bestrahlung in Halden und Petten im Rahmen anderer Projekte angewandt wurde, d.h. trockene Mahlung mit einer fortgeschrittenen Attritionsmühle und darauf folgende Kompaktierung und Sinterung. Für die Fabrikation des Vipac-Brennstoffes wurde eigens für dieses eine Route Projekt entwickelt: Sie umfasst eine Vorkompaktierung des gleichen Pulvers, wie für die Tabletten-Fabrikation, eine Granulation der Kompakte und Sinterung der Granulate zu dichten Partikeln.

Im Laufe dieses Projektes fand eine grosse Menge von F&E statt. Die idealen Gelierungsparameter und die Sinterungsbedingungen für die 20%Pu-MOX und den MOX mit zusätzlichem Inhalt von 5% Np mussten untersucht und bestimmt werden. Die Vipac-Fabrikation sowie die adäquaten Füllungsprozeduren für Sphere-pac und Vipac, um die spezifizierte mittlere Dichte zu erreichen, mussten entwickelt werden. Schliesslich wurde die Brennstoffmodellierung zur Voraussage des Brennstoffverhaltens einschliesslich des Sinterungsvorgangs und der Änderung der thermischen Leitfähigkeit gewaltig verbessert. Viele wissenschaftliche Publikationen zeugen von der hohen Qualität und Relevanz der bisher geleisteten Arbeit.

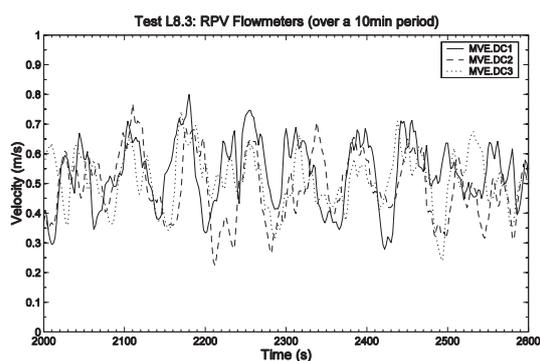
Die hergestellten Segmente werden derzeit in vier Serien (jeweils vier Segmente) im HFR bestrahlt. Dabei werden sowohl die radiale Brennstofftemperatur-Verteilung sowie die Bestrahlungsgeschichte kontrolliert, um möglichst gleiche Bedingungen wie beim Anfahren in einem schnellen Reaktor zu gewährleisten. Nach einem Abbrand von etwas weniger als 1 GWd/t werden die Segmente zwecks NBU entladen, um die frühe Restrukturierung mittels Keramographie und EPMA zu untersuchen.

ALPHA [9]: Das Projekt ist derzeit sehr stark im 5. EU-Rahmenprogramm eingebettet, woher auch ein grosser Teil seiner Finanzierung kommt. Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene experimentelle und analytische Untersuchungen passiver fortgeschrittener Reaktorkonzepte durchgeführt, insbesondere grossmassstäbliche Konzeptdemonstrationen passiver Kühlsysteme in der PANDA-Anlage. Eines der innovativsten passiven Merkmale in der Auslegung von SWR der nächsten Generation ist die auf Naturzirkulation basierende Wärmeabfuhr aus dem Kern, gepaart

typischerweise mit Kernen grosser Dimensionen, um höhere Leistung zu erzielen. Beides, Naturzirkulation und grosse Kerne, sind für Instabilitäten anfällig, und, weil sich Erfahrung mit Naturzirkulation-Raktoren nur auf kleine Reaktorkerne beschränkt, wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl von diesbezüglichen Forschungsaktivitäten angeregt. Das Projekt NACUSP innerhalb des 5. EU-Rahmenprogrammes befasst sich mit Stabilitätsfragen in heutigen und zukünftigen SWR, indem es das Basisverständnis mit gut strukturierten Experimenten und Analysen experimenteller und betrieblicher Stabilitätsdaten verbreitet und die allgemeinen Richtlinien für den Reaktorbetrieb und die Auslegung so verbessert, dass Instabilitäten in SWR vermieden werden können.

Um die Strömung bei Naturzirkulation zu verbessern, machen zukünftige SWR-Konzepte mit Naturzirkulation von langen Steigrohren über dem Kern Gebrauch. Solche Anordnungen neigen dazu bei der Anfahrphase instabil zu sein, wenn das System von der einphasigen zur zweiphasigen Naturzirkulation übergeht. Die resultierenden Strömungszusatzschwingungen grosser Amplitude können zu mechanischen Schwingungen und daraus resultierenden Schäden an Reaktorkomponenten führen. Ein für die Anfahrphase von naturzirkulationgekühlten SWR wichtiger Instabilitätsmodus ist durch „Flashing“ induzierte Instabilität. Damit bezeichnet man Dampferzeugung ohne jegliche Wärmequelle im langen adiabatischen Teil des Steigrohres oberhalb des Kernes. Existierende experimentelle Daten über Flashing-induzierte Instabilität wurden in relativ kleinen Anlagen für einen breiten Bereich von Druck und Leistung gesammelt. Mit PANDA, wo z. B. die Skalierung des RDB gegenüber dem ESBWR-Konzept von General Electric 1:1 in der Höhe und 1:40 im Volumen ist, kann die experimentelle Datenbasis in Richtung grösserer geometrischer Massstäbe und prototypischer Höhen, die aktuellen Anlagenauslegungen entsprechen, erweitert werden.

Innerhalb des NACUSP-Projektes wurden 25 PANDA-Tests durchgeführt, um das Naturzirkulations- und Stabilitätsverhalten bei Bedingungen mit niedrigem Druck und kleiner Leistung zu untersuchen, wo Flashing möglicherweise eine wichtige Rolle spielt. Für diese Tests wurde die bereits umfangreiche Instrumentierung im PANDA-RDB mit verschiedenen Temperatur- und Druckdifferenz-Messstellen vervollständigt, und insbesondere auch mit einer speziellen Messung des RDB-Kühlmittelniveaus und mit drei Ultraschall-Strömungsmesssystemen zur Messung der Geschwindigkeit der Umwälzströmung an drei azimutal unterschiedlichen Stellen im RDB-Fall-



Figur 5a: Gemessene Umwälzgeschwindigkeit an 3 azimuthal verschiedenen Stellen im Fallrohr des PANDA-RDB

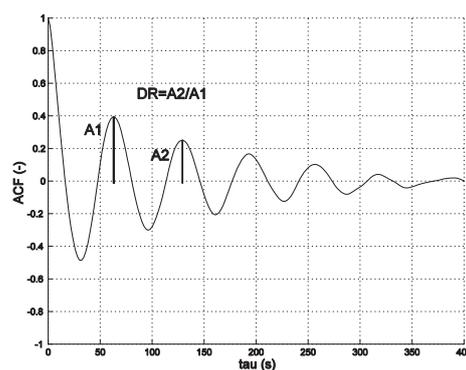
rohr ergänzt. Für die durchgeführten stationären Tests wurden die Hauptparameter variiert, die das Stabilitätsverhalten beeinflussen (d. h. Druck, Leistung, Strömungswiderstand am Kerneintritt und Wasserniveau). Die Figuren 5a und 5b zeigen typische Testresultate für einen linear stabilen Fall (Dämpfungsfaktor <1), aber mit grossen Strömungszosillationen der Umwälzung. Auf der Basis verschiedener Evaluationen der Messungen (u. a. Spektralanalyse und Autokorrelations-Funktion) konnten die durchgeführten Tests klassifiziert und die experimentellen Beobachtungen mit der erwarteten Phänomenologie gekoppelt werden.

Die neue erweiterte Datenbasis wird derzeit im Rahmen von Post-Test Berechnungen genutzt, um die Möglichkeiten und Grenzen verschiedener verfügbarer Codes abzuschätzen, das Strömungsverhalten unter solchen Bedingungen vorauszusagen. Insbesondere müssen die zum Teil widersprüchlichen Resultate und die bei der Vorbereitung der PANDA-Tests aufgetretenen Schwierigkeiten mit verschiedenen Codes abgeklärt werden.

GANZHEITLICHE BETRACHTUNG VON ENERGIESYSTEMEN

GaBE [10]: Das Projekt GaBE zur "Ganzheitlichen Bewertung von Energiesystemen" führte eine Reihe interdisziplinärer Analysen im Rahmen internationaler Forschungsprojekte und im Auftrag von Kunden durch. Diese umfassen unter anderem die Aufstellung neuer Energiesystem-Inventare im Rahmen des *ecoinvent*-Projektes.

ecoinvent ist eine zentralisierte, Internet-basierte Lebenszyklus-Analyse (LCA) Datenbank, die mit Unterstützung schweizerischer Bundesämter (BUWAL, BfE, ASTRA, BBL, BLW) vom Schweizerischen Zentrum für Lebenszyklus-Inventare (EMPA,

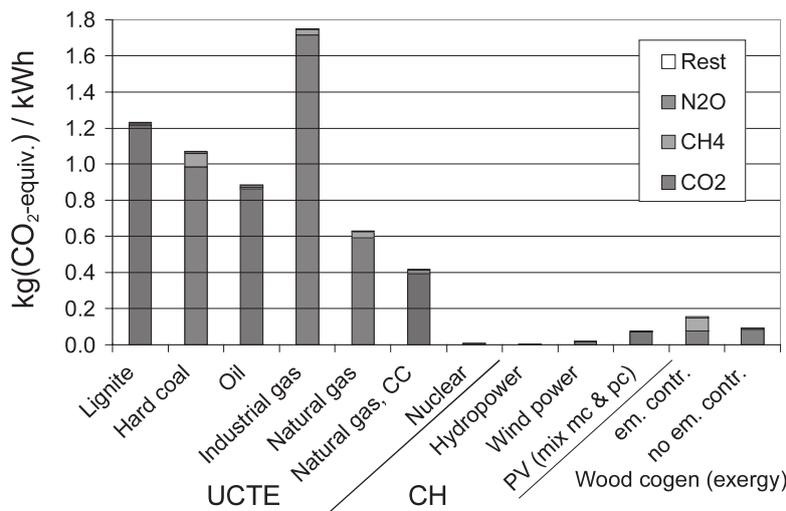


Figur 5b: Autokorrelations-Funktion eines Geschwindigkeitssignals aus Figur 5a: Der Dämpfungsfaktor von ~ 0.64 deutet auf linear stabile Bedingungen hin

PSI, ETHZ, EPFL, FAL) entwickelt und implementiert wurde. Seit September 2003 ist ihre erste benutzerfreundliche Version online für Kunden verfügbar.

Das Hauptziel des Projektes *ecoinvent* 2000 war, Konsistenz zwischen den verschiedenen LCA-Datenbanken zu erreichen, die bisher von den teilnehmenden Organisationen unterhalten wurden, sowie diese Datenbanken aufzudatieren und sie in einer Einheit zu integrieren. Letztere umfasst: Energiesysteme (PSI); Materialien und Metalle (EMPA); Transportsysteme (ETHZ); Abfallbehandlung und -entsorgung (EMPA); Chemikalien (ETHZ); und landwirtschaftliche Produkte (FAL). Etwa 2500 einzelne Verfahren wurden modelliert und 1000 elementare Umweltflüsse inventarisiert, einschliesslich Emissionen, fester Abfälle, Nutzung energetischer und nicht-energetischer Ressourcen, und Landnutzung. Die Moduln sind auf der Basis eines Algorithmus integriert, und spiegeln so die Wechselwirkungen von Industrieaktivitäten innerhalb eines Wirtschaftssystems wider. *ecoinvent* ist ein einzigartiges Produkt, welches Basisinformationen über die gesamthaften Umweltbelastungen für LCA-Studien, integrierte Produktpolitik, vergleichende Bewertung und weitere Forschung liefert.

Die bewerteten Energiesysteme, welche etwa die Hälfte aller in der Datenbank verfügbaren Prozesse ausmachen, umfassen Elektrizitäts- und Wärmesysteme. Elektrizitätsübertragung und -verteilung sowie länderspezifische Erzeugungs- und Versorgungsmixe wurden ebenso modelliert. Fossile, nukleare und erneuerbare Systeme, die zu schweizerischen und europäischen Kraftwerken, Kesseln und Wärme-Kraft-Kopplungs-Werken gehören, wurden aufgrund von Rahmenbedingungen aus dem Referenzjahr 2000 bewertet. Ein Beispiel der Ergebnisse wird auf Fig. 6 gezeigt.



Figur 6: Übersicht der Treibhausgas-Emissionen aus der ganzen Kette verschiedener Stromerzeugungssysteme. Braun- und Steinkohle, Erdöl, Industriegas, Erdgas und Kernkraft: europäische (UCTE) Kraftwerke; Erdgas CC: Kombi-Kraftwerk bester derzeitiger Technologie mit mittleren Europäischen Bedingungen für die Gasversorgung; Erneuerbaren (Wasserkraft, Wind, Photovoltaik, WKK aus Holz): Standort Schweiz.

Internationale Zusammenarbeit

Alle oben aufgeführten Projekte finden im Rahmen intensiver internationaler Zusammenarbei-

ten statt. Eine detaillierte Auflistung befindet sich auf http://nes.web.psi.ch/link_partners.html.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Die Ziele aller Projekte wurden im Jahr 2003 erfüllt. Besonders hervorzuheben ist der erfolgreiche Abschluss mehrerer Projekte innerhalb des 5. EU-Rahmenprogrammes (z. B. NACUSP, TEMPEST, SGTR, GRETE, CASTOC u. a.), der Phase II von LWR-PROTEUS sowie des langjährigen Projektes Fortgeschrittene Brennstoffzyklen. Ende 2003 hat sich die Plenare Forschungskommission des PSI mit der Energieforschung am PSI befasst und hat insbesondere neue Projektabsichten des NES begutachtet; ihr diesbezüglicher Bericht wird Anfang 2004 erwartet.

Das Jahr 2004 wird das Anlaufen neuer Projekte und Exzellenznetzwerke innerhalb des 6. EU-Rahmenprogrammes sehen, an welchen sich der NES beteiligt: NF-PRO, ACTINET, SARNET, NEEDS. Ferner läuft in 2004 die Evaluation weiterer EU-Projekte auf dem EURATOM-Gebiet mit massgeblicher NES-Beteiligung. Die Forschungsverträge mit der HSK zu den Projekten STARS und HRA

müssen in 2004 erneuert werden. Parallel werden die Beiträge zur F&E im Rahmen des GIF, insbesondere zu den Hochtemperatur-Materialien und zu den Sicherheitsanalysen von Reaktoren mit schnellen Spektren konkretisiert und strukturiert:

- HT-Materialien: Auswahl und Charakterisierung adäquater Materialien für Nutzung bei hoher Temperatur und Fluenz in zukünftigen Reaktorsystemen. Entwicklung von Materialverhaltensmodellen basierend auf mikrostrukturellen Veränderungen, z.T. untersucht mit neuartigen Techniken.
- FAST: Entwicklung eines Codesystems für Sicherheitsanalysen von nuklearen Systemen, die mit schnellen Spektren betrieben werden.

Schliesslich soll das LES im Februar 2004 von einer internationalen Expertengruppe auditiert werden.

Liste der F+E-Projekte

Die Jahresberichte werden auch im *Scientific Report 2003 Volume IV* des PSI erscheinen (zu bestellen bei: PSI, CH - 5232 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://systems.web.psi.ch/hra>, (JB)
- [3] F. Jatuff, (fabian.jatuff@psi.ch), PSI, Villigen: **LWR-PROTEUS**; <http://proteus.web.psi.ch>, (JB)
- [4] W. Hoffelner (wolfgang.hoffelner@psi.ch), PSI, Villigen: **EDEN**, www.web.psi.ch/eden0.htm, (JB)
- [5] D. Kalkhof, (dietmar.kalkhof@psi.ch), PSI, Villigen: **INTEGER**, www.web.psi.ch/lww.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] Ch. Hellwig (christian.hellwig@psi.ch), PSI, Villigen: **Fortgeschrittene Brennstoffzyklen**, www.web.psi.ch/afcproj.htm, (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] St. Hirschberg (stefan.hirschberg@psi.ch), PSI, Villigen: **GaBE**, <http://gabe.web.psi.ch>, (JB)

REGULATORISCHE SICHERHEITSFORSCHUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Brigitte Faust

brigitte.faust@hsk.ch



Felslabor Mont Terri

Nische des *Heater*-Experiments, das hauptsächlich zur praktischen Überprüfung von Rechenmodellen dient (*Comet*).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Um die Sicherheit aller Kernanlagen dauerhaft zu erhalten bzw. zu verbessern, bedarf es entsprechender Sicherheitsforschung. Das Kernenergiegesetz (KEG) verlangt bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie sowohl die Umsetzung der Betriebserfahrung in die Aufsichtspraxis, als auch die Berücksichtigung des neuesten Standes von Wissenschaft und Technik (Art. 4a KEG). Hierfür fördert der Bund angewandte Forschung, insbesondere für die Sicherheit der Kernanlagen und der nuklearen Entsorgung (Art. 86 KEG). Neben einer sorgfältigen Priorisierung der Forschungsthemen wird auf eine effektive Mittelverwendung und eine möglichst direkte Umsetzung der aus der Forschung gewonnenen Erkenntnisse geachtet. Dabei beteiligt sich die Schweiz stark an internationalen Projekten und kooperiert mit ausländischen Universitäten und Behörden. So erzielt sie mit dem ihr zur Verfügung stehenden Geld nicht nur gut abgesicherte Ergebnisse und besseres Fachwissen, sondern kann Synergien nutzen und ihre Attraktivität als Forschungs- und Industriestandort erhalten. Besonders wichtig ist auch der Erfahrungsaustausch mit anderen Sicherheitsbehörden.

Das zunehmende Alter der Kernkraftwerke, der wachsende Kostendruck auf die Betreiber, politische Probleme bei der nuklearen Entsorgung in der Schweiz, die Gefahr des abnehmenden Expertenwissens durch den Generationenwechsel und der sinkende Stellenwert der Kernenergie in der Ausbildung von Fachleuten verlangt von der nuklearen Aufsichtsbehörde mehr Effizienz, Effektivität, Ausgewogenheit und Nachvollziehbarkeit. Die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) verbindet deshalb in ihrer Aufsicht vermehrt risiko-, prozess- und ergebnisorientierte Ansätze. Zusammen mit einer wirkungsvollen Verwaltungsführung entsteht ein neues ganzheitliches Konzept, die so genannte integrierte Aufsicht. Die Regulatorische Sicherheitsforschung hat sich im Jahr 2003 abhängig von den praktischen Bedürfnissen sowie aktuellen und künftigen Herausforderungen der Kernenergienutzung auf die nachfolgend aufgeführten Fachgebiete konzentriert:

Reaktorsicherheit: Darunter versteht man sowohl die Sicherheit des Reaktors als Gesamtsystem, als auch der damit verbundenen Einzelkomponenten. Wichtige Fragen sind auch die betriebliche Organisation und Verbindungsstellen zum Strahlenschutz. Durch das zunehmende Alter der Kernanlagen stehen die Materialforschung (me-

chanische, thermische, chemische und strahleninduzierte Alterung bzw. Versprödung der Werkstoffe), die Stör- und Unfallforschung (wesentlich unterstützt durch die deterministische und probabilistische Sicherheitsanalyse) sowie der Ersatz der ursprünglichen durch rechnergestützte Leittechnik im Vordergrund.

Strahlenschutz: Darunter versteht man Massnahmen zum Schutz des Personals und der Umgebung der Kernanlagen gegen ionisierende Strahlung. Dieser Themenbereich umfasst zudem auch radiologische und sicherheitstechnische Aspekte der Wasserchemie, wobei letztere zur Beurteilung möglicher Korrosion metallischer Komponenten eine wesentliche Rolle spielt. Radioanalytik, Dosimetrie, die Entnahme radioaktiver Proben aus Systemen und Freimessungen sind sicherheitsrelevant. Der Erhaltung von Expertenwissen kommt in diesem Bereich nicht nur für den Betrieb der Kernanlagen, sondern auch für deren Rückbau eine besondere Bedeutung zu.

Umgang mit radioaktiven Abfällen, Stilllegung und Endlagerung: Darunter versteht man zum einen das Sammeln von radioaktiven Abfällen (gemäss Art. 3 KEG), deren provisorische Aufbewahrung, Konditionierung im Werk, zum anderen deren Transport zum Zwischenlager. Weiter geht es um Sicherheitsanalysen zum Nachweis der Endlagersicherheit sowie um die Felsmechanik und Sicherheit von geologischen Tiefenlagern. Hierbei spielt in der Forschung neben der Beschaffenheit des Opalinustons auch die Auswertung von Demonstrationsversuchen zum Verhalten einzelner Komponenten eine wesentliche Rolle.

Querschnittsthemen: Diese Themen haben eine übergreifende Dimension und schaffen eine horizontale Verbindung zu den oben aufgeführten „klassischen“ Themen der nuklearen Sicherheit. Dazu gehören auch Fragestellungen, die nicht nur den Nuklearbereich betreffen, sondern auch in anderen Industriezweigen bearbeitet werden und Synergien erlauben (z.B. Arbeitssicherheit, menschliche Leistungsfähigkeit, Organisationskultur, Ergonomie). Weiter beinhalten die Querschnittsthemen sicherheitsrelevante Fragestellungen politischer, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Natur (z.B. Deregulierung, soziologische Fragen, Ausbildung, Kommunikation). Konkret werden in diesem Bereich heute Fragen zur Auswahl von geeignetem Personal, der Umgang mit menschlichem Fehlverhalten und dessen Ursachen sowie die Automation und der Einsatz von Simulatoren untersucht.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

REAKTORSICHERHEIT

RIKORR II – Risskorrosion in druckführenden ferritischen Komponenten des Primärkreislaufs von Siedewasserreaktoren [1]: Bei diesem Projekt, durchgeführt vom Paul Scherrer Institut (PSI), handelt es sich um die Untersuchung von Alterungsphänomenen bei Siedewasserreaktoren zur Beurteilung der Strukturintegrität des Reaktor-druckbehälters. Im Jahr 2003 wurde das Risskorrosionsverhalten von niedriglegierten RDB-Stählen und von Schweißgutwerkstoffen unter stationären und transienten Betriebsbedingungen eines Siedewasserreaktors getestet. Insbesondere wurde der Einfluss durch eine kurzzeitige Erhöhung von Chloridanteilen im Primärwasser auf das Spannungsrisskorrosionsverhalten in verschiedenen ferritischen RDB-Stählen beim Betrieb mit Normalwasserchemie (NWC)-Fahrweise untersucht. Ein internationaler Ringversuch und die Zusammenarbeit des PSI mit der Tohoku-Universität (Japan) ergänzen das Untersuchungsprogramm. Während der Berichtsperiode wurden umfangreiche Umbauarbeiten zur Implementierung der Wasserstoffchemie (HWC)-Fahrweise in den PSI-Heisswasserkreisläufen erbracht, um den Einfluss kurzzeitiger Chloridzunahme wirklichkeitsnäher abbilden zu können.

Diagnostik [2]: Das Projekt soll Methoden zur Früherkennung von Materialermüdung in Rohrleitungen aus nichtrostendem austenitischem Stahl entwickeln, wobei Effekte der Martensitbildung ausgenutzt werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Materialausgangszustand bzw. die chemische Zusammensetzung (z.B. Nickel- und Chromanteile) und Mikrostruktur eine wesentliche Rolle bei der Martensitbildung spielen. Sowohl Neutronendiffraktions-Experimente, als auch magnetische Messungen verdeutlichen, wie stark der Erschöpfungsgrad bzw. die Belastungszyklenzahl den Martensitanteil erhöhen können. Im Berichtsjahr waren Materialcharakterisierung, Probenfertigung sowie Aufbau einer Versuchsanlage für thermische Ermüdung Hauptinhalt der Tätigkeiten. In den nächsten Jahren dienen Materialkennlinien zusammen mit Messungen im Kernkraftwerk Beznau der Entwicklung eines thermodynamischen Werkstoffmodells zur deformations-induzierten Martensitbildung in rostfreien austenitischen Stählen.

STARS – Sicherheitsforschung bezüglich Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz [3]: Das Projekt dient der Unterstützung

deterministischer Sicherheitsanalysen in Bezug auf das Brennstoff- und Abbrandverhalten. In diesem Jahr hat man sich unter anderem auf die Analyse von Parameterunsicherheiten bei hohem Abbrand konzentriert. Fortschritte wurden bei der Fluenzrechnung mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen unter Einsatz von Varianzreduktionsmethoden erzielt. Bei einzelnen CABRI-RIA Experimenten [7] hat man einen Einblick zum Verhalten von MOX-Brennstäben bei Transienten bekommen, wobei Nachrechnungen gut mit der gemessenen Spaltgasfreisetzung übereinstimmten. Durch den Vergleich von Rechenprogrammen mehrerer Anwender lassen sich thermohydraulische Fragestellungen besser beurteilen sowie hierfür erforderliche Unsicherheitsanalysen optimieren.

OECD Halden Reactor Project – Fuels and Material [4]: 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 Halden-Reaktor hat man im Berichtszeitraum 16 Experimente durchgeführt, in denen keramische Brennstoffe (UO_2 , 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 rostfreie Stähle auf Risswachstum und strahleninduzierte Veränderungen zu untersuchen. Eine wesentliche Rolle spielten dabei die früheren Experimente mit unbestrahltem Brennstoff.

Melt-Structure-Water Interactions (MSWI) Project During Postulated Severe Accidents in LWRs [5]: Das Projekt wird von Behörden und Betreibern der Schweiz, Schweden und Finnland finanziert und von der Hochschule KTH Stockholm durchgeführt. Es untersucht Parameter und Phänomene bei einem schweren Unfall mit Kernschmelzen sowie den Einfluss von Kühlmöglichkeiten innerhalb und ausserhalb des Reaktor-druckbehälters auf den Unfallablauf (siehe Abbildung 1). Weiter beschäftigt es sich mit möglichen thermischen und mechanischen Belastungen sowie mit allfälligen Wechselwirkungen von Schmelze mit dem Druckbehälter und mit Kerneinbauten.

PHEBUS Fission Products Programme [10]:

Seit 1997 beteiligt sich die Schweiz am internationalen Phébus-Projekt. Die Schweizer Beiträge des PSI befassen sich im Wesentlichen mit Jodchemie- sowie der Heisszellenuntersuchungen. *Phébus-FP* ist ein am französischen Versuchsreaktor in Cadarache mit echtem Kernbrennstoff durchgeführtes Integral-Experiment zur Untersuchung von Kernschmelzunfällen (siehe Abbildung 3). Ziel ist die Verringerung von Unsicherheiten bei der Bewertung von Menge und Art radioaktiver Zerfallsprodukte bei einem Kernschmelzunfall. Die Experimente zeichnen sich aus durch eine gute Skalierung und Instrumentierung unter verschiedenen thermohydraulischen und physikalisch-chemischen Bedingungen. Damit kann gewährleistet werden, dass die Daten auf reale Unfallsituationen übertragbar sind. Schwerpunkte im Berichtsjahr waren insbesondere die Validierung und Verbesserung von Rechenmodellen bzw. Computercodes, Quelltermuntersuchungen im Primärkreislauf und Containment (wichtig für die Notfallplanung), die Weiterentwicklung der Mess- und Leittechnik sowie die Sicherheitsbewertung von Kernanlagen der nächsten Generation.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten interessante Aspekte des Freisetzungsverhaltens. Es wurden zum Teil sehr kleine Teilchengrößen bei freigesetzten Aerosolen beobachtet. Man fand häufig Elemente des Steuerstabs (Ag, In, Cd) sowie leicht flüchtige Spaltprodukte wie Cs. Leider konnte man Brennstoffelemente (U, Np, Pu, Am und Cm), refraktäre Elemente (Re, Pd, Zr, W) und schwerflüchtige Spaltprodukte (Lanthanide, Sr,

Ru, Sb) nicht aufspüren, da deren Konzentrationen unter der Nachweisgrenze lagen. Massenspektrometrische Analysen von Spaltprodukten, Actiniden und Elementen der Strukturmaterialien in Auslaug-Lösungen (Massenbilanz) werden bis Ende Februar 2004 durchgeführt und der zugehörige Bericht bis Ende März 2004 erstellt.

Die Jodchemie hat sich schwieriger als erwartet erwiesen, da sich das Silber in den Versuchen nicht wie erwartet verhalten hat. Ob es im Reaktorsumpf radioaktives Jod zurückhalten kann, hängt von zahlreichen noch nicht vollständig bekannten Bedingungen ab. Neben der chemischen Form von Jod spielt das Redoxpotential im Containment eine entscheidende Rolle. Verschiedene Meinungen existieren zu Fragen nach der Herkunft von leichtflüchtigem Jod sowie auch nach der Art und Weise, wie thermochemische Verhältnisse im Containment die Bildung von organischem Jodid beeinflussen. Auch bleiben zahlreiche Fragen im Zusammenhang mit der Messtechnik offen. Beispielsweise lassen sich auch mit Hilfe der Ionenchromatographie einzelne Jodformen kaum getrennt quantifizieren.

OECD Projekt: Fire Incident Record Exchange (FIRE) [11]:

Es werden Daten zu Brandereignissen in Kernkraftwerken der OECD-Mitgliedstaaten gesammelt, um Ausbreitung und Wirkung eines Brandes zu analysieren. Mit den erzielten Ergebnissen lassen sich die phänomenologische und statistische Basis werkspezifischer PSA-Studien verbessern. Da Brandereignisse in Kernkraftwerken sehr selten sind, ist ein Zusammenschluss

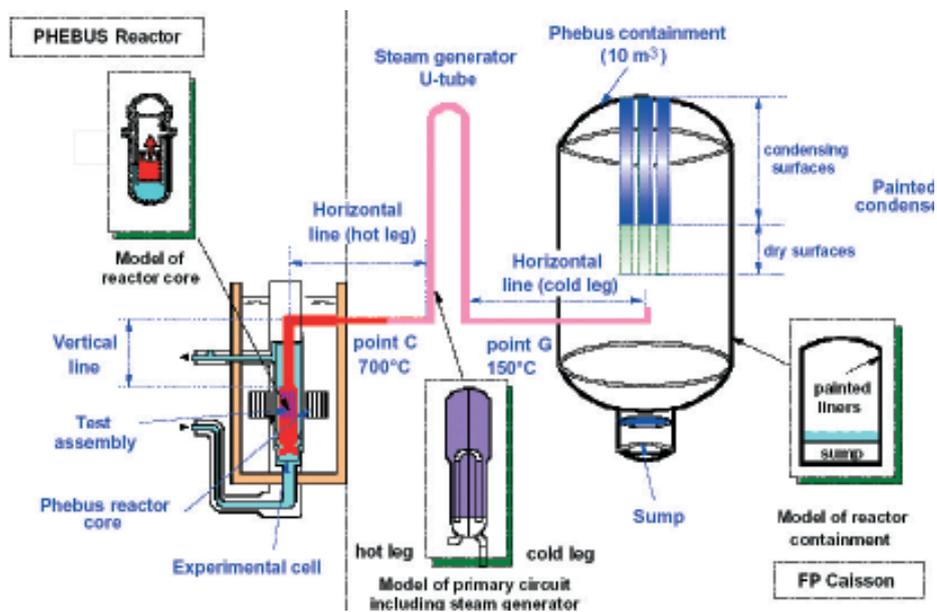


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Phébus Versuchsanlage für die FPT-0 und FPT-1 Tests

auf internationaler Basis zwingend notwendig. Von der HSK wurden je zwei Brandereignisse aus der Zeit vor 2001 codiert und den entsprechenden Werken zum Korreferat zugeschickt. Im Jahr 2004 sollen alle «historischen» Brandereignisse codiert und in die Datenbank aufgenommen werden. Damit wird eine erste Version der Datenbank zur Verfügung stehen, in die zukünftige Brandereignisse von Schweizer Kernkraftwerken mit der OECD-FIRE Codierungssystematik eingebaut werden können.

Co-Operative Research Activities US-NRC & HSK [12]: Seit einigen Jahren beteiligt sich die Schweiz im Rahmen eines Abkommens mit der amerikanischen Sicherheitsbehörde an wichtigen Projekten zur schweren Unfallforschung. Durch detaillierte Analysen schwerer Unfälle lässt sich ein breites Wissen erarbeiten, welches die Minderung der Unfallfolgen ermöglicht. Bei COOPRA (Cooperative Probabilistic Risk Assessment Research) handelt es sich um Zusammenarbeit und Austausch von Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der probabilistischen Sicherheitsanalyse (Risiko durch Abschalten, Brand-PSA, Risikoinformierte Entscheidung und Betriebliche Einflussgrößen auf Risiko). CSARP (Cooperative Severe Accident Research Programme) befasst sich mit analytischen und experimentellen Untersuchungen des Anlageverhaltens bei schweren Unfällen (Wechselwirkung zwischen Kernschmelze, Wasser und Reaktorbehälter sowie zwischen Baustrukturen). Ziel ist unter anderem die Verbesserung des Computercodes MELCOR zum Modellieren der Schmelze selber und der sie umgebenden Betonstruktur. Als dritter Bereich gilt die Alterungsforschung, welche die Materialalterung und deren Auswirkung untersucht.

Im Berichtsjahr wurde die Zusammenarbeit zwischen COOPRA und der OECD-CSNI Arbeitsgruppe „Working Group on Risk Assessment“ (WG-Risk) weiter vertieft, weshalb zusätzliche Meetings und gemeinsame Berichte geplant sind.

STRAHLENSCHUTZ

Aeroradiometrie 2 [13]: Die Aeroradiometrie erfasst radioaktive Strahlenquellen am Boden durch Messungen aus der Luft in einem Helikopter. In der Messübung des Jahres 2003 konnte bei der Suche nach radioaktiven Quellen zusammen mit dem Spürtrupp des österreichischen Bundesministeriums des Innern demonstriert werden, wie nützlich eine direkte Auswertungs- und Darstellungssoftware (online-Auswertung) sein kann. Alle Anwender der Computer-Codes wurden

laufend geschult und die Benutzeranleitung entsprechend dem Feedback angepasst. Im Herbst konnte mit einer Erneuerung der Messsysteme begonnen und das dafür notwendige Material beschafft werden. Bis zu den Messflügen 2004 werden zwei moderne Messsysteme zur Verfügung stehen. Im Rahmen des Ende 2003 auslaufenden EU-Projektes ECCOMAGS wurde ein Datenformat für den internationalen Austausch von Aeroradiometriedaten definiert und implementiert. Sämtliche während der internationalen Messübung RESUME2002 in Schottland aufgenommenen Daten sollen in diesem Format archiviert werden.

Zusammenarbeit in der Dosimetrie [14]: Frei- und Oberflächenkontaminationsmessungen spielen neben der Personendosimetrie eine wichtige Rolle im Strahlenschutz. Im Berichtsjahr wurden normgerechte Messmethoden weiterentwickelt, um Resultate besser vergleichen und nachvollziehen zu können. Es wurde ein tragbarer Oberflächenkontaminationsmonitor unter Einbezug von Kalibrierungen und Vergleichsrechnungen bezüglich Empfindlichkeit und Nachweisgrenzen evaluiert. Die Mitglieder des EU-Projektes EVIDOS konnten wertvolle Erkenntnisse gewinnen, um elektronische Neutronendosimeter nach dem neuesten Stand der Wissenschaft und Technik weiterzuentwickeln. Die Einrichtung eines Kompetenzzentrums bei der Sektion Messwesen des PSI für die Überprüfung von Raum- und Abluftanlagen wurde erfolgreich vorangebracht. Ziel ist die Bestimmung von Aerosolverlusten in komplexen Leitungssystemen. Erste Erfahrungen mit der Umsetzung der HSK-Richtlinie R-13 haben die Qualität der Freimessungen im Zusammenhang mit den Rückbauten des PSI deutlich erhöht.

Zusammenarbeit in der Radioanalytik [15]: Die Radioanalytik beschäftigt sich u.a. mit radiochemischen Messungen und Analysen von Boden- und Wasserproben zur Umgebungsüberwachung und zur Inkorporationsüberwachung von strahlenexponierten Personen. Hierbei spielen sowohl die Eichung und Kalibrierung von Messgeräten, als auch das Weiterentwickeln von Methoden zur Evaluation der Ergebnisse eine wesentliche Rolle. Im Berichtsjahr wurde ein Germanium-Detektor für weiche Protonenstrahlung kalibriert sowie Rechenprogramme zur Berechnung von Probengeometrien, Absorptionsverlusten und Koinzidenzeffekten implementiert. Massenspektrometrische Messungen erlaubten die Bestimmung von α -Strahlern bei der Umgebungsüberwachung kerntechnischer Anlagen. Man entwickelte eine Schnellmethode, mit der Proben von α -Strahlern sowohl präpariert, als auch in Grund- und Trinkwasserproben

nachgewiesen werden können. Es wurden zwei Ringvergleiche von Bodenproben sowie von synthetischem Wasser und Reaktorwasser bezüglich γ -Strahler durchgeführt.

Angiogenesis -Evaluation einer kombinierten Therapie mit tumorvaskulaturspezifischen Reagentien und ionisierender Strahlung [16]:

Bei der Angiogenesis handelt es sich um die Bildung neuer Blutgefäße. Der Begriff Tumor-Angiogenesis im Besonderen bezieht sich auf das Wachstum bösartiger Zellansammlungen bei Blutgefäßen eines sich in der Entstehung befindlichen Tumors (durch zusätzliche Abgabe chemischer Substanzen). Das Projekt zur Evaluation einer kombinierten Therapie mit tumorvaskulaturspezifischen Reagentien und ionisierender Strahlung soll Wirkstoffe organspezifisch in Tieren an ihren Zielort bringen. Liposome dienen als Trägervehikel, da sie durch Modifikation mit Antikörpern ihr Ziel im lebenden Tier ansteuern können. So kann man sie z.B. für Therapie- und Diagnosezwecke mit Radionukliden oder zellschädigenden Substanzen beladen. Im Berichtsjahr wurden spezielle Antikörper zur Erkennung von sich in der Tumorvaskulatur befindenden Eiweiße isoliert. Bessere Methoden zur Kopplung dieser Antikörper an Liposome erlauben es nunmehr, mehr modifizierte Liposome für Tierversuche herzustellen. Wie sich solche Liposome auf die verschiedenen Organe verteilen, wurde im Berichtsjahr am Tiermodell untersucht.

Molekularbiologische Untersuchungen zur zellulären Radiosensitivität [17]:

Das Wachstum vieler Tumore ist von der Blutversorgung abhängig. Das Projekt beabsichtigt, die Radiosensitivität von Endothelzellen (Zellschicht, welche die Innenseite von Blutgefäßen auskleidet und gegenüber dem Gewebe abgrenzt) in Tumorblutgefäßen zu erhöhen und dadurch Radiotherapien wirkungsvoller zu gestalten. Die Forschungsarbeiten liefern grundlegende Daten zur Radiosensitivität von Endothelzellen für eine kombinierte Gen- und Radiotherapie. Man möchte ein strahleninduzierbares Gen entwickeln, das zur Expression und Sekretion von toxischem Protein in bestrahlten Zellen führt. Dieses könnte das Tumorgewebe lokal beschädigen und so die Radiotherapie unterstützen.

UMGANG MIT RADIOAKTIVEN ABFÄLLEN, STILLLEGUNG UND ENTSORGUNG

Felslabor Mont Terri [18]: Die Schweiz ist Mitte 2003 dem internationalen Projekt „Felslabor Mont Terri“ beigetreten, um in Ergänzung zur Sondierbohrung Benken die bautechnische Machbarkeit

und die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers im Opalinuston besser beurteilen zu können. Die Experimente im Felslabor Mont Terri ermöglichen Erkenntnisse zur Felsmechanik und Gesteinsbeschaffenheit, zur Hydrogeologie und Hydrochemie sowie zum Einschlussvermögen des Opalinustons. Das Migrationsverhalten freigesetzter Elemente über grössere Distanzen lässt sich mit den im Labor erarbeiteten Transporteigenschaften kombinieren, um sicherheitsrelevante Kennzahlen zu ermitteln. Ziel ist, die Eigenschaften von Opalinuston zu beschreiben. Von der EU finanziell unterstützte Demonstrationsversuche veranschaulichen das Verhalten einzelner Komponenten des Endlagersystems (Engineered Barrier Experiment, Heater Experiment).

Das Projekt erlaubt es den Beteiligten, nicht nur bereits entwickelte Modelle und Rechenwerkzeuge zur Überprüfung des Entsorgungsnachweises Opalinuston an konkreten Datensätzen des Felslabors zu validieren, vielmehr kann sich die schweizerische Forschung in einer internationalen Plattform (Deutschland, Frankreich, Belgien, Spanien und Japan) über Forschungsarbeiten in anderen Länder informieren.

Wenngleich eine Lagerung von radioaktiven Abfällen aufgrund der komplexen Randbedingungen in Mont Terri mit seinen Jura-Faltungen nicht in Frage kommt, ergänzen dort durchgeführte Experimente die erdwissenschaftlichen Untersuchungen der NAGRA für den Entsorgungsnachweis (siehe Abbildung 4), welcher die Machbarkeit einer sicheren Endlagerung hochradioaktiven Abfalls im Opalinuston zeigen soll.

QUERSCHNITTSTHEMEN

OECD Halden Reactor Project – Man Machine Systems Research [4]:

Das Projekt untersucht die Leistungsfähigkeit und die 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. Im Berichtsjahr wurde ein dynamisches Operateurmodell getestet, um zu untersuchen, wie sich der Automatisierungsgrad beim Ausführen von Prozeduren auf die Operateurleistung auswirkt. Man untersuchte, wie sich Operateure in verschiedenen Situationen, z.B. bei einem Ausfall automatischer Systeme verhalten. Weiter wurden rechnergestützte Hilfsmittel sowie die Art der Informationsdarstellung im HAMMLAB und in Kernkraftwerken mit realen Daten getestet.

HRA – Human Reliability Analysis [19]: Mit der HRA werden die Einflüsse von menschlichen Handlungen, welche bei einem Störfall zum Tragen kommen, analysiert und deren Fehlerwahrscheinlichkeiten ermittelt. Somit stellt sie einen wichtigen Bestandteil der Probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) dar. Das Projekt „Human Reliability Analysis“ dient der Quantifizierung von so genannten 'Error of Commissions' (EOC's) und der Entwicklung von Operateur-Simulationsmodellen, um diese in dynamische PSA-Modelle einzubinden.

Die EOC's sind ungeplante, menschliche Handlungen, welche den Verlauf eines Störfalls negativ beeinflussen. Um sie systematisch zu erfassen, wurden im Berichtsjahr 25 reale Fehlhandlungen aus der internationalen Nuklearpraxis zur Definition von Referenzfällen und Quantifizierung menschlicher Faktoren untersucht. Man kann jetzt

diese Einflussgrößen auf der Basis von Referenzwahrscheinlichkeiten beschreiben, erhält so wirklichkeitsnähere Modelle. Da die Identifikation und Quantifizierung von EOC's bisher unvollständig sind, wurden sie in einer probabilistischen Sicherheitsanalyse nicht umfassend berücksichtigt. Auf diese beiden methodischen Schwächen geht das Forschungsprojekt ein.

Mit dynamischen PSA-Modellen (d.h. zeitabhängige Modelle für das Anlagen- und Personalverhalten) lassen sich die Interaktionen zwischen Mensch und Anlage besser ableiten. In einer ersten Fallstudie wurde die Reaktion des Personals bei einem Frischdampfleitungsbruch untersucht. Ab 2004 sollen die Ergebnisse der dynamischen Ereignisanalyse ausgewertet sowie wesentliche Sequenzen einschliesslich der Fehlermöglichkeiten innerhalb verschiedener Szenarien untersucht werden.

Standort	Schichtbeschreibung	Mächtigkeit (m)
MONT TERRI	Murchisonae-Sch.	40 m
	Tonsteine mit zahlreichen Sandstein- und Kalklagen	24 m
	Tonsteine	23 m
	Tonsteine	73 m
WEIACH	Murchisonae-Sch.	13.9 m
	Tonsteine mit Sandsteinlagen und Sideritkonkret.	8.9 m (1)
	Tonsteine mit zahlreichen Sandsteinlagen	20.9 m (2)
	Tonsteine	19.7 m
BENKEN	Murchisonae-Schichten	19.7 m
	Tonsteine mit Sandsteinlagen und Sideritkonkret.	12.5 m
	Tonsteine mit zahlreichen Sandsteinlagen	19.1 m
	Tonsteine mit wenigen Sandsteinlagen	49.1 m
	Tonsteine mit Sideritkonkretionen	47.7 m
Benken (weiter unten)	Tonsteine mit Sideritkonkretionen	15.7 m
	Tonsteine	54.2 m

Abbildung 4: Gliederung und Korrelation des Opalinustons von Weiach, Benken und Mont Terri aufgrund der Gesteinseigenschaften und der mineralogischen Zusammensetzung

Nationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit mit den forschungsausführenden Instituten 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 (NAZ), 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. 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, NA-CUSP – Natural circulation and stability performance of BWRs

OECD Halden Reactor Project [4]

PHEBUS FP Programme [10]: EURATOM, Nr. FIKS-1999-00008, ICHEMM – Iodine chemistry and mitigation methods

Aeroradiometrie 2 [13]: EURATOM, Nr. FIKR-2000-20098, ECCOMAGS – European calibration and co-ordination of mobile and airborne gamma spectrometry

Zusammenarbeit in der Dosimetrie [14]: EURATOM, Nr. FIKR-2001-00175, EVIDOS – Evaluation 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 [5]

OECD-MCCI [6]

OECD CABRI Water Loop Project [7], [8], [9]

PHEBUS FP [10]

OECD-FIRE [11]

US-NRC & HSK Co-Operative Research Activities [12]

OECD Halden Reactor Project [4]

Felslabor Mont Terri [18]

Weitere internationale Kooperationen im Rahmen von Forschungsprojekten, internationalen Organisationen und Standardisierungsaktivitäten können den einzelnen Projektberichten entnommen werden.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Mit wenigen Ausnahmen konnten alle Projekte im Berichtsjahr planmässig abgewickelt werden. Sie lieferten wichtige wissenschaftliche Grundlagen, welche direkt oder indirekt in die regulatorischen Aktivitäten der HSK einfliessen werden. Der Transfer der wissenschaftlichen Ergebnisse in die operativen Bereiche der HSK und umgekehrt kann dank der guten Arbeitsbeziehungen mit den Projektleitern und ihren Teams jederzeit reibungslos erfolgen. Der Kompetenzerhalt und -ausbau innerhalb der Aufsichtsbehörde sowie die Bereitstellung von wichtigen neuen Forschungsthemen für die Wissenschaftler sind somit gewährleistet. Der Trend zu internationalen Forschungsk Kooperationen setzte sich auch in diesem Jahr fort.

Die Forschungsprojekte, welche im Jahr 2004 gestartet werden, orientieren sich inhaltlich ebenfalls an den einleitend beschriebenen Forschungs-

schwerpunkten. Grösstenteils handelt es sich dabei um Nachfolgeprojekte der im Berichtsjahr abgeschlossenen Aktivitäten.

Im Jahr 2003 nahm eine gemeinsame Arbeitsgruppe der HSK und der Eidgenössischen Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA) ihre Arbeit zum Thema «Strategie Regulatorische Sicherheitsforschung» auf. Es wurde ein Strategiepapier 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. Das Strategiepapier wird vor seiner Veröffentlichung mit interessierten Stellen aus Forschung, Wirtschaft und Politik eingehend besprochen. Es wird die Grundlage für die künftige Ausrichtung der regulatorischen Sicherheitsforschung bilden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2003 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

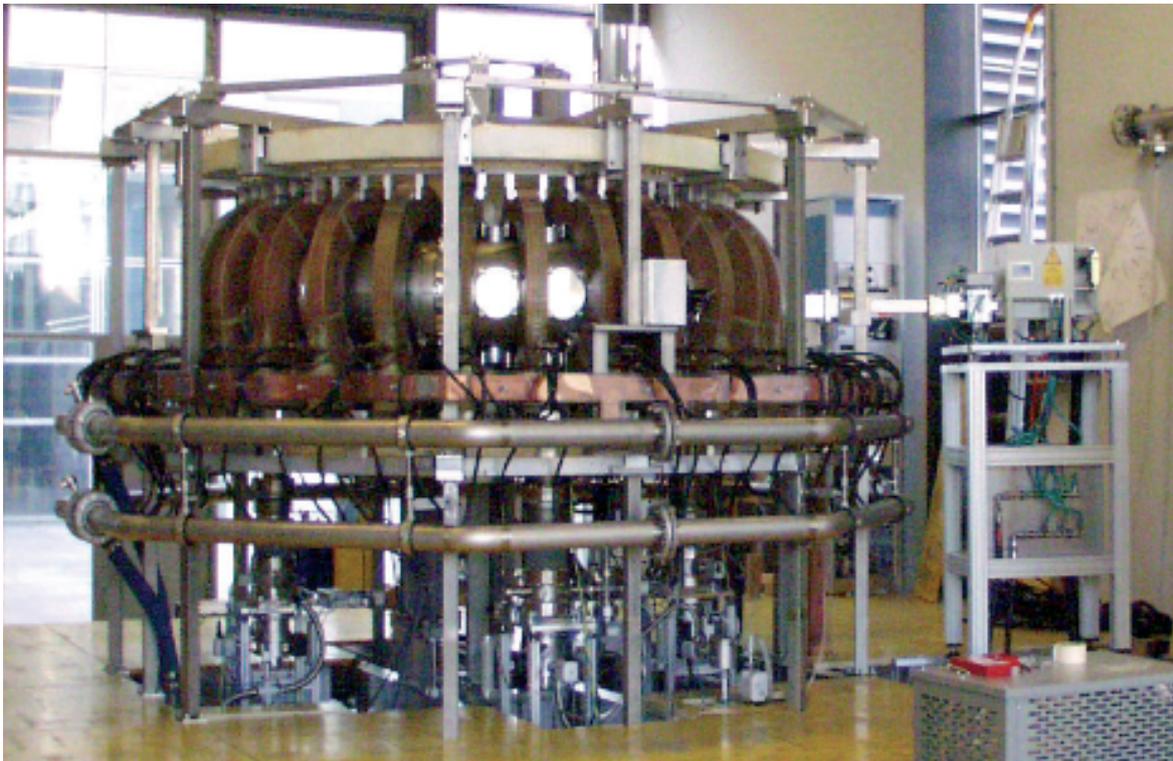
1. H.P. Seifert (hans-peter.seifert@psi.ch), S. Ritter, U. Ineichen, U. Tschanz, B. Gerodetti, Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Risskorrosion in druckführenden ferritischen Komponenten des Primärkreislaufs von SWR (RIKORR)** (SB), ENET-Nr. 230040.
2. D. Kalkhof, H. Leber, M. Niffenegger, B. Tirbonod (dietmar.kalkhof@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Labor für Werkstoffverhalten, 5232 Villigen PSI, **Diagnostik für Werkstoffschädigung durch Ermüdung** (JB)
3. M. A. Zimmermann (martin.zimmermann@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Sicherheitsforschung bezüglich Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz (STARS)** (JB)
4. 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)
5. B.R. Sehgal, H.S. Park, A. Giri, A. Karbojian, A. Jasiulevicius, R.C. Hansson, U. Chikkanagoudar, D. Shiferaw, and A. Stepanyan (bsehgal@energy.kth.se), Division of Nuclear Power Safety - Royal Institute of Technology Sweden, **MSWI Project during Postulated Accidents in LWRs** (JB)
6. Sudhamay Basu (sxb2@nrc.gov), U.S. Nuclear Regulatory Commission, **OECD MCCI** (JB)
7. C. Mäder (claudio.maeder@hsk.ch), HSK, 5232 Villigen, **Begutachtung zum Jahresbericht OECD CABRI Water Loop Project** (JB)
8. Summary record of the ninth meeting of the Technical Advisory Group of the OECD - IRSN **CABRI WL Project**, Madrid, 20 - 21 November 2003
9. Note Technique DRS 2003/1999 **Cabri Water Loop** IRSN 2003/47, Status Report Nr. 7
10. Z. Kopajtic, D. Gavillet, J. Birchley, S. Güntay, (jonathan.birchley@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **PHEBUS Fission Product Programme, Schweizer in-kind Beiträge** (JB)
11. Andrew J. Szukiewicz (asj2@nrc.gov), US-NRC **Co-Operative Research Activities US-NRC & HSK**
12. S. Brosi (stefan.brosi@hsk.ch), HSK, 5232 Villigen, **OECD FIRE** (JB)
13. B. Bucher, Ch. Wernli (benno.bucher@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Aeroradiometrie 2** (JB)
14. CH. Schuler, M. Boschung, G. Butterweck, C. Wernli (christoph.schuler@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Zusammenarbeit in der Dosimetrie** (JB)
15. S. Bajo, J. Eikenberg (sixto.bajo@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Zusammenarbeit in der Radioanalytik** (JB)
16. K. Ballmer-Hofer, C. Marty (kurt.ballmer@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Evaluation einer kombinierten Therapie mit tumorvaskulaturspezifischen Reagentien und ionisierender Strahlung** (JB)
17. A. Anstett, C. Chastel, K. Ballmer, J. Jiricny, R. Jaussi (rolf.jaussi@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Molekularbiologische Untersuchungen zur zellulären Radiosensitivität** (JB)
18. E. Frank (erik.frank@hsk.ch), HSK, 5232 Villigen, **Felslabor Mont Terri** (JB)
19. V. N. Dang (vinh.dang@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Human Reliability Analysis Applications and Methods Development (HRA)** (JB)

FUSION THERMONUCLÉAIRE CONTRÔLÉE

Rapport de synthèse pour le programme de recherche 2003

Jean-François Conscience

jean-francois.conscience@bbw.admin.ch



TORPEX

Un nouvel instrument du Centre de recherche en physique des plasmas (CRPP) à l'EPF de Lausanne pour étudier les phénomènes de turbulence et de transports anormaux dans les plasmas toroïdaux.

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, le Fonds national suisse de la recherche scientifique et l'Union Européenne, elles sont effectuées, pour l'essentiel, au Centre de recherche en physique des plasmas (CRPP) de l'EPF de Lausanne, 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 por-

tant 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 contrôlée est sous la responsabilité de l'Office fédéral de l'éducation et de la science (OFES) qui publie, chaque année, un «Rapport Fusion» plus détaillé que ce bref compte-rendu. Ce rapport est disponible sur les sites Internet d'ENET (www.energieforschung.ch) ou de l'OFES (www.bbw.admin.ch); il peut aussi être commandé auprès du soussigné (jean-francois.conscience@bbw.admin.ch).

Travaux effectués et résultats acquis en 2003

L'ESSENTIEL EN BREF...

- Les États-Unis, la Chine et la Corée du Sud se sont joints au projet ITER, alors que le Canada s'en est retiré; avec la Russie, le Japon et l'Union Européenne, le projet compte donc maintenant 6 partenaires.
- Deux sites restent en compétition pour la construction d'ITER : Cadarache, en Provence, et Rokkasho-mura, dans la partie nord de l'île principale du Japon.
- Le 24 juin 2003, le professeur Minh Quang Tran de l'EPFL a été nommé *EFDA-Leader*, c'est-à-dire chef du programme fusion européen, tâche qu'il partage avec celle de directeur du CRPP.
- Le 10 décembre 2003, le Conseil fédéral a adopté la prolongation du *Contrat d'Association Suisse-EURATOM jusqu'au 31 décembre 2005*.
- Au CRPP de l'EPF de Lausanne, l'année 2003 a vu la mise en service d'une nouvelle installation de recherche sur les plasmas, TORPEX (voir la page de titre); elle sera utilisée avant tout pour étudier les phénomènes de turbulence et de transports anormaux dans des plasmas toroïdaux.
- Au bénéfice d'une prolongation de son contrat avec l'OFEN, le groupe du professeur Oelhafen (Institut de physique de l'Université de Bâle) a renoué le contact avec le centre

de recherche de Jülich (Allemagne) et son installation TEXTOR; cette collaboration, qui s'inscrit dans le cadre d'un *Implementing Agreement* de l'Agence internationale de l'énergie, se consacre à l'étude des modifications de surface consécutives à l'exposition au plasma.

ITER (INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REACTOR)

Le projet a considérablement agrandi son champ géographique d'intérêt puisqu'en début d'année 2003 les États-Unis, la Chine et la Corée du Sud ont rejoint le Japon, la Russie et l'Union Européenne à la table des négociations. Rappelons que, pour les USA, c'était un peu le retour au bercail puisqu'ils avaient quitté un projet plus ambitieux et plus coûteux en 1997 pour des raisons scientifiques, financières et politiques. En revanche, le Canada, dont le gouvernement fédéral a persisté dans son refus de co-financer sa participation, a dû retirer son offre de site et quitter le projet. Entre les six partenaires restant, de très grands progrès ont été réalisés quant à la définition de la structure de l'organisation future qui gèrera la construction et l'exploitation d'ITER et quant au partage des coûts. Sur ce dernier point, on déplorera que les États-Unis, qui sont tout de même la première puissance économique mondiale et dont le Département de l'énergie a mis ITER en tête de ses priorités, n'acceptent pas de contribuer à plus de 10 % au projet, c'est à dire au même taux que

la Corée, la Chine et la Russie, laissant la part du lion au Japon et à l'Union Européenne.

C'est la question du site d'ITER qui a fait couler le plus d'encre en 2003. En début d'année, deux sites européens, Cadarache en France et Vandellós en Espagne, étaient en compétition et, à l'irritation des partenaires internationaux, il a fallu attendre le 27 novembre pour que le Conseil de l'Union Européenne choisisse le site provençal comme proposition européenne unique et définitive. En contre-partie, l'Espagne obtenait la promesse de voir le *Joint Undertaking* (selon les termes du traité EURATOM) qui gèrera la participation de l'Union Européenne à ITER s'installer sur son sol et un des directeurs futurs du projet sera espagnol. Après le retrait canadien, Cadarache n'était plus opposé qu'au site japonais de Rokkasho-mura, dans la partie nord de l'île principale. À fin 2003, la situation était complètement bloquée : les États-Unis et la Corée soutenant le site japonais, la Chine et la Russie le site européen. Il faut espérer que la situation se déblocuera rapidement en 2004, car même les plus chauds partisans d'une implantation en Provence sont d'accord pour dire que le plus important, pour la dynamique du projet, est une décision rapide, quelle qu'elle soit.

COOPÉRATION EUROPÉENNE DANS LE CADRE D'EURATOM

Pratiquement toute la recherche effectuée en Europe dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée se déroule au sein d'un programme de l'UE, dans le cadre du traité EURATOM. Ce programme – rattaché aux PCRDT (Programmes cadres de recherche, de développement technologique et de démonstration) de l'UE 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 cofinance 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. Or, le 24 juin 2003, c'est le professeur Minh Quang Tran, directeur du CRPP, qui a été élu chef de ce programme (*EFDA Leader*) par le Comité de gestion (*EFDA Steering Committee*) qui regroupe les représentants des pays participant et de l'Union Européenne. Cette nomination en dit long sur l'estime dont jouit le CRPP dans les milieux européens de la fusion, mais c'est aussi une belle marque de confiance accordée au professeur Tran, puisque les partenaires de l'EFDA ont accepté qu'il exerce sa nouvelle charge à temps partiel afin de pouvoir continuer de diriger le CRPP.

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, le *Contrat de mobilité*, qui encourage les échanges de personnel, et le *Contrat d'Association*, qui définit les modalités de coopération du CRPP avec le programme fusion européen. Ce dernier contrat arrivait à échéance le 31 décembre 2003 ; le Conseil fédéral a donné son accord le 10 décembre 2003 à sa prolongation pour deux ans. La contribution suisse au programme fusion d'EURATOM s'est élevée en 2003 à un peu plus de 8 millions de francs, auxquels s'ajoutent 0,5 million de 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 au 6^e PCRDT de l'UE et qui sont gérés par l'OFES.

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. 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*). Sur ce dernier point, les travaux préparatoires pour entamer le plus vite possible les EVEDA (*Engineering Validation and*

Engineering Design Activities) de cette future installation ont fait de grands progrès en 2003, et la conviction est maintenant générale qu'elle est aussi indispensable qu'ITER sur la voie de la domestication de la fusion. Comme par le passé, le CRPP a continué en 2003 d'être étroitement associé à toutes ces activités¹. Ses recherches en matière de fusion thermonucléaire contrôlée portent, d'une part, sur la physique du *tokamak*, la technologie de la fusion (en particulier, le chauffage du plasma), la théorie et la simulation numérique à l'EPFL et, d'autre part, sur la supraconductivité et les matériaux au PSI.

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 planifier la géométrie optimale du cœur des futures centrales à fusion. C'est dans ce contexte que les recherches en physique des plasmas se sont poursuivies à l'EPFL. 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. Pour permettre ces études pendant les périodes de fonctionnement du TCV, d'importants travaux de perfectionnement des infrastructures et des outils de diagnostic ont été effectués pendant les périodes d'interruption.

En 2003, une nouvelle installation pour la physique des plasmas a été mise en service au CRPP. Appelée TORPEX (pour *Toroïdal Plasma Experiment*), 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 des physiciens spécialisés sur les plasmas. Il s'agit d'un tore d'un diamètre extérieur d'un mètre. Des plasmas d'argon et d'autres gaz nobles peuvent y être produits de façon très reproductible par chauffage aux ondes cyclotron-électroniques à des pressions de 10^{-4} à 10^{-5} mbar. Différents paramètres peuvent être ajustés pour contrôler les profils de densité et de température du plasma. Après la première obtention de plasma en mars, l'année a surtout permis d'optimiser le processus de production du 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*» (un autre concept de confinement magnétique du plasma) 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 de fusion 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 2003 à l'antenne du CRPP située au PSI. En raison de la mise hors service de l'installation PIREX, les études expérimentales ont été faites sur la source de neutrons SINQ et un effort particulier a porté sur la modélisation. Par exemple, la figure 1 présente une image tirée d'un film d'animation qui modélise *in silico* la propagation d'une perturbation dans un monocristal d'or de 15,5 nm de côté et contenant 250'000 atomes. 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.

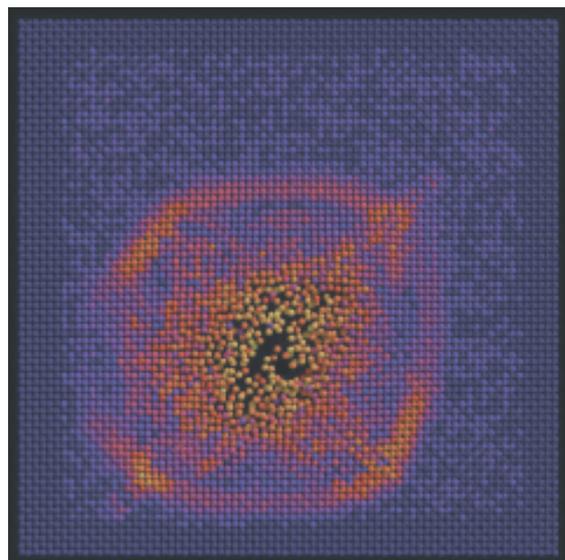


Figure 1: modélisation de la propagation d'une perturbation dans un monocristal d'or de 1,5 nm de côté contenant 250'000 atomes

¹ Les personnes qui désirent plus détails sur les recherches du CRPP peuvent commander le Rapport annuel que publie cette institution (<http://crppwww.epfl.ch>).

L'expertise mondialement reconnue du CRPP dans le développement de chauffage par ondes cyclotron-électroniques fait que cette institution s'est vue confier le rôle de laboratoire chef de file en Europe pour le développement du gyrotron destiné à ITER (170 GHz, 2 MW). L'élaboration du concept de l'instrument a bien avancé en 2003, de telle sorte que sa construction peut maintenant démarrer. En parallèle, l'installation à Lausanne d'un banc d'essai pour ce gyrotron est en préparation.

Pour terminer, le CRPP a été impliqué dans deux études socio-économiques, en collaboration avec d'autres institutions du Domaine des EPF. Avec le CEPE (*Centre for Energy Policy and Economics*) de l'EPF de Zurich, la perception des risques liés à la fusion a été étudiée dans différents groupes géographiques, en Europe en général (Suisse, Belgique, France et Autriche) et dans la région de Cadarache. Le LASEN (Laboratoire de systèmes énergétiques), lui, s'est penché sur les scénarios globaux d'approvisionnement en énergie à l'horizon 2100 et du rôle que pourrait y jouer la fusion.

Collaboration avec l'Université de Bâle

À l'Institut de physique de cette Université, 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. Une collaboration étroite est établie depuis plusieurs années avec le CRPP. Des tuiles de carbone placées à l'intérieur du TCV sont analysées à Bâle en vue de comprendre les phénomènes qui ont lieu durant les décharges de plasma (érosion, re-déposition, libération d'impuretés). En 2003, cette collaboration a subi une éclipse momentanée, alors que le contact, interrompu depuis plusieurs années, a été repris avec le Centre de recherche de Jülich en Allemagne (*Forschungszentrum Jülich*).

Ce centre dispose en effet, avec le *tokamak* TEXTOR, d'une installation qui se prête particu-

lièrement bien à l'étude des interactions entre le plasma et les parois internes de l'instrument. Dans le cadre d'une collaboration qui fait partie d'un *Implementing Agreement (Plasma-Wall Interaction in TEXTOR)* de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie), le groupe bâlois a étudié les changements survenus à la surface de miroirs optiques de molybdène après exposition au plasma. De tels miroirs, en effet, seront utilisés dans les systèmes de diagnostic prévus pour ITER afin de mesurer le rayonnement lumineux émis par le plasma dans un large intervalle de longueurs d'onde. Les études en cours sur TEXTOR portent sur différentes sortes de surface de molybdène déposées par différentes techniques et ont pour but aussi bien de caractériser les changements de ces surfaces que d'identifier les meilleures techniques de déposition.

Autres collaborations et aspects internationaux

COLLABORATION DANS LE CADRE DE L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE (AIE)

Le programme de l'AIE en fusion nucléaire est étroitement coordonné avec les programmes de recherche nationaux et avec d'autres programmes internationaux, y compris le programme EURATOM. Les *Implementing Agreements (IA)* permettent de réaliser des activités de R&D en exploitant efficacement le savoir combiné d'experts et en évitant des duplications inutiles. Huit IA

sont actuellement en cours d'exécution et un neuvième (*Spherical Tori*) 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 et les chercheurs suisses sont directement impliqués dans deux d'entre eux, l'un concernant la recherche sur les matériaux (CRPP-PSI, voir ci-dessus), l'autre étudiant les interactions entre le plasma et les parois du réacteur (Université de Bâle, voir ci-dessus). L'un de ces IA, celui consacré aux matériaux, revêt une importance

toute particulière, puisque c'est dans son cadre que les travaux préparatoires pour les EVEDA (*Engineering Validation and Engineering Design Activities*) d'IFMIF (voir ci-dessus) s'effectuent.

Le regain d'intérêt pour la fusion comme source d'énergie, que le précédent rapport signalait, a été porté en 2003 à l'attention du *Governing*

Board de l'AIE réuni au niveau ministériel les 28 et 29 avril. Ce dernier a pris note d'un document sur l'avenir de l'approvisionnement en énergie (*Energy Technology : Facing the Climate Challenge*) qui accorde une place importante à la fusion dès 2050. En outre, le stand «fusion», monté dans une exposition annexe à la réunion, a attiré de nombreux ministres.

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).

Remerciements

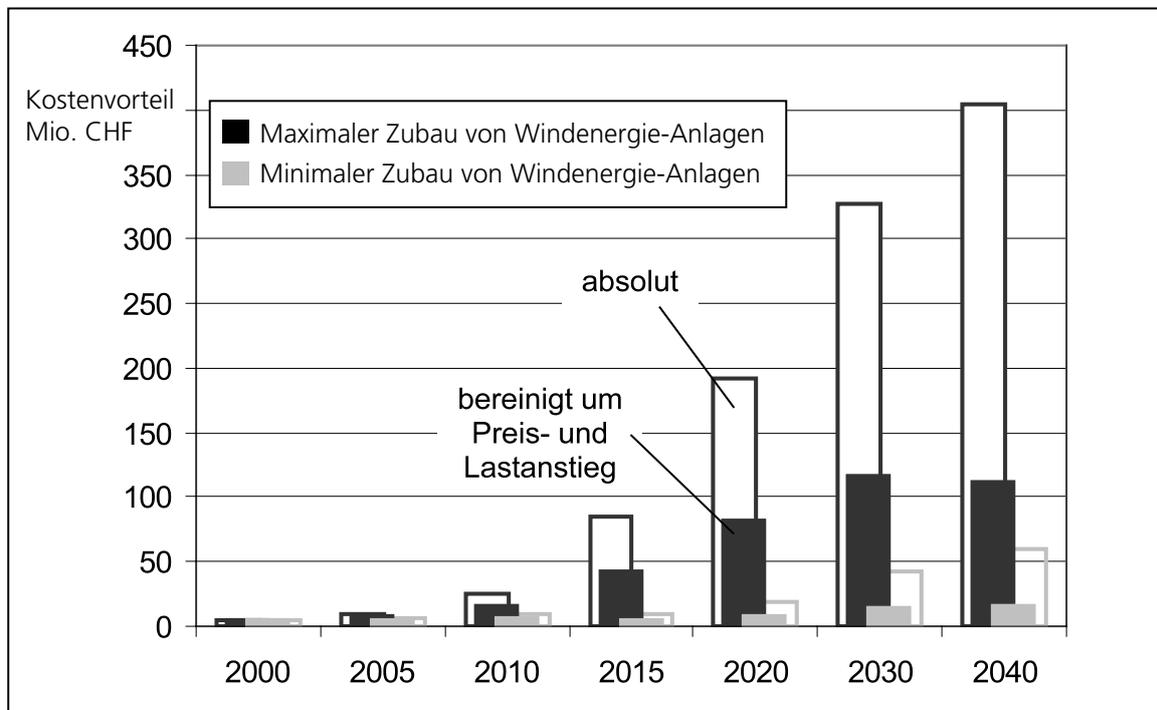
L'auteur remercie le professeur Minh Quang Tran, Directeur du CRPP, de son aide pour la rédaction des paragraphes concernant les recherches menées à son institution. Il remercie également le professeur Peter Oelhafen de sa contribution.

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN EWG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2003

Lukas Gutzwiller

lukas.gutzwiller@bfe.admin.ch



Synergien zwischen der Windenergie und dem schweizerischen Wasserkraftpark

Die Beteiligung der schweizerischen Wasserkraftwerke am internationalen Regelenenergiemarkt bringt Kostenvorteile. Potentielle Interessenten für Regelenenergie sind Betreiber von Windenergie-Anlagen, für welche Pumpspeicherkraftwerke auch wirtschaftlich interessant sind.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im Forschungsprogramm *Energiewirtschaftliche Grundlagen (EWG)* des Bundesamts für Energie werden wirtschaftliche, soziale und umweltrelevante Fragen der Produktion, Verteilung bzw. Nutzung von Energie behandelt. Sie stellen eine Basis für die Beantwortung von politischen Vorstössen, die Ausarbeitung von Botschaften des Bundesrats, aber insbesondere auch die längerfristige Ausrichtung der Energiepolitik dar. Die Forschungsergebnisse des Programms kommen zudem den Kantonen sowie verschiedenen Verbänden und Organisationen zugute.

Beim Programm *Energiewirtschaftliche Grundlagen* wird in der Regel von den technischen Gegebenheiten im Energiebereich ausgegangen, um darauf abgestützt die zentralen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Fragen fokussiert und mit geeigneten Methoden zu bearbeiten. Gleichzeitig bedeutet dies, dass eine intensive Zusammenarbeit mit den Akteuren der technischen Energieforschungsprogramme wie auch den entsprechenden Wissensträgern aus Wirtschaft und Gesellschaft besteht. So werden praktisch alle Projekte des Forschungsprogramms von Personen sowohl aus dem technischen wie auch dem wirtschaftlichen und sozialen Bereich begleitet. Interdisziplinarität (das heisst der Einbezug verschiedener Fachrichtungen) sowie Transdisziplinarität (das heisst konkrete, gesellschaftlich relevante Fragestellungen als Ausgangspunkt) sind eine Selbstverständlichkeit. Nur so können die Fragen des Verhaltens von Investoren, Unternehmungen, Haushalten und der Akteure der öffentlichen Hand angemessen untersucht und lösungsorientierte Strategien erarbeitet werden.

Im Jahre 2003 standen wiederum die Analyse der Kosten- und Wirtschaftlichkeit von Energiesystemen und die Untersuchung der Wirkungsweise von Massnahmen (inklusive Lösungsansätze) im Vordergrund. Zu diesem Thema wurden dreizehn Projekte abgeschlossen oder weitergeführt und elf neue Projekte begonnen. Insgesamt fünfzehn Projekte betreffen den Gebäudebereich; mehrere dieser Projekte wurden im August 2003 auch an der Tagung des Departements Erfolgskontrolle der kantonalen Energiefachstellen vorgestellt.

Zur **Umsetzung** der Resultate wurden drei wichtige EWG-Berichte im Gebäudebereich in einer allgemein verständlichen Broschüre **Wärmeschutz bei Wohnbauten – Kosten und Nutzen** zusammengefasst. Mit dem Vertrieb dieser Broschüre wurde der *Verein Minergie* beauftragt, so dass eine kundennahe Information gewährleistet ist. Die 24-seitige Broschüre wurde an der Pressekonferenz anlässlich der *Hausbau und Minergie-Messe* im November 2003 vorgestellt und ist auf ein positives Echo bei den Anwendern gestossen.

Im Frühjahr 2003 ist eine **Ausschreibungsrunde** mit zehn EWG-Projekten durchgeführt worden. Nach wie vor kann ein reges Interesse von privaten Büros, teilweise auch von Universitäten und Fachhochschulen an einer Projektbearbeitung festgestellt werden. Pro ausgeschriebenes Projekt wurden zwei bis sechs Offerten eingereicht. Die Offerteingaben weisen in der Regel ein hohes Niveau auf.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2003

DATEN

Ausgangspunkt zum Projekt **Erklärung der kantonalen Unterschiede von Energiekennzahlen bei Neubauten** [1] war, dass bei einer Erhebung der Energiekennzahlen (EKZ) von Neubauten in 14 Kantonen im Jahr 2000 grosse Unterschiede zwischen den Kantonen zu Tage getreten sind. Mit der vorliegenden Untersuchung sollen die Bestimmungsfaktoren für die EKZ ermittelt und die bestehenden Unterschiede erklärt werden. Bei den Resultaten stimmen die Modellannahmen zu den Einflussfaktoren, die Einschätzung der Lei-

ter der Energiefachstellen und die Ergebnisse der Fallstudien mehrheitlich überein.

Die gesetzlichen Anforderungen bestimmen den Baustandard im Wesentlichen. Die Unterschiede zwischen SIA 180/1 und SIA 380/1 betragen rund 80 MJ/m²a und sind damit bedeutend. Es bestehen auch regionale Unterschiede beim BenutzerInnenverhalten. Im Kanton VD wird gegenüber dem Kanton TG deutlich mehr gelüftet und rund 30% mehr Wasser pro Person verbraucht. Die gesetzlichen Anforderungen bei der Haustechnik werden regional unterschiedlich erfüllt. Im Kanton

VD fehlen oft Warmwassermesseinrichtungen, Messeinrichtungen für die verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung in Mehrfamilienhäusern und Isolationen im Heizungsraum. Im Kanton TG wurden bei keinem der Gebäude Mängel festgestellt. Ein Zusammenhang zwischen der Betreuungsintensität der Vollzugsorgane sowie der Unterstützung der Planer mit der EKZ ist ersichtlich.

MODELLE UND PERSPEKTIVEN

Die Vorstudie *Vision 2050: Nachhaltige Energieversorgung und Energienutzung in der Schweiz* [2] wurde im Frühjahr 2003 abgeschlossen. Energierrelevante Technologien und Strukturen zeichnen sich zum Teil durch sehr lange Reinvestitionszyklen und Vorlaufzeiten der Forschung und Entwicklung aus. Mehr als die Hälfte des derzeitigen Primärenergieverbrauchs fällt in Bereichen an, in denen Entscheidungen über Forschungs- und Entwicklungsausgaben oder gar konkrete Investitionsentscheidungen in den nächsten Jahren anstehen, welche die Gestalt des Energiesystems 2050 massgeblich beeinflussen. Die Vorstudie schlägt zur weiteren Untersuchung die Backcasting-Methode vor. Diese Methode ist am besten geeignet zur Formulierung der Strategien und Massnahmen, die zum Erreichen langfristiger Nachhaltigkeitszielen erforderlich sind. Anders als bei den letzten Energieperspektiven von 1996 (Szenarien I bis II) ist dabei ein normativer bzw. zielorientierter Ansatz der Szenariobildung verlangt.

Basierend auf dieser Vorstudie wurde entschieden, das Gesamtprojekt *Vision 2050* an die soeben angelaufenen Perspektivarbeiten zu koppeln, um so die Synergien bestmöglich nutzen zu können. In der Neuauflage der Perspektivarbeiten mit Zeithorizont 2035 werden voraussichtlich vier Szenarien mit unterschiedlichen politischen Rahmenbedingungen erarbeitet. Bei den ersten beiden Szenarien wird die Politik vorgegeben und geschaut, wie sich die Energienachfrage entwickelt; die beiden andern Szenarien sind so genannt normative Szenarien, d.h. es wird geschaut, mit welchen Massnahmen und zu welchen Kosten vorgegebene Energieziele (CO₂-Reduktion, Absenkung Stromverbrauch, Erhöhung Anteil erneuerbare Energieträger und Grad der Versorgungssicherheit) erreicht werden können. Die *Vision 2050* wird an das zweite normative Szenario gekoppelt. Zudem soll sie sich aber durch eine breitere Sichtweise der Energie- und Klimaproblematik von den Energieperspektiven unterscheiden.

KOSTEN, WIRTSCHAFTLICHKEIT UND AKZEPTANZ VON ENERGIESYSTEMEN

Zur Beurteilung der wirtschaftlichen Entwicklung neuer Energietechnologien wurden zwei Projekte abgeschlossen und eines neu begonnen. Das erste befasste sich mit der **Zukünftigen Marktbedeutung von Klein WKK-Anlagen** [3]. Dieses kam zum Schluss, dass in den vergangenen 10 Jahren die Entwicklung der Wärmekraftkopplung vor allem durch den Preiserfall für motorische WKK-Module geprägt war: die Stromgestehungskosten sind zwischen 1990 und 2000 teuerungsbereinigt um über 40% gesunken. Bis 2010 ist unter der Annahme von leicht steigenden Energiepreisen eine spürbare Reduktion der Stromgestehungskosten nur noch unterhalb einer Leistung von 50 kW_{el} zu erwarten. Mikrogasturbinen weisen bis zum Jahr 2010 ein enormes Kostensenkungspotenzial auf, welches vor allem durch Skalen- und Lerneffekte bei einer stark gesteigerten Produktion ermöglicht wird. Es scheint deshalb sehr wahrscheinlich, dass durch die Entwicklung der Mikrogasturbinen die Stromgestehungskosten der Wärmekraftkopplung im Leistungsbereich von 25 kW_{el} bis 100 kW_{el} in den nächsten Jahren stark sinken werden. Betreffend der künftigen Entwicklung der Brennstoffzellen bestehen noch grosse Unsicherheiten. Bis 2010 könnten am ehesten kleine Brennstoffzellenheizgeräte an Bedeutung gewinnen.

In einer ersten Phase des **Technologie-Monitoring** [4] wurden exemplarisch motorische Wärmekraftkopplungsanlagen (100 und 400 kW_{el}), Brennstoffzellenheizgeräte für Ein- und Mehrfamilienhäuser, Luft-/Wasserwärmepumpen für neue Einfamilienhäuser sowie die Hochleistungswärmedämmung untersucht. Aufgrund der Ergebnisse der bisherigen Entwicklung der untersuchten Technologien konnten die wesentlichen Einflussfaktoren ermittelt werden. Es zeigt sich dabei, dass die Kostenentwicklung nicht nur durch die technologischen Fortschritte bestimmt wird, sondern dass auch rein ökonomische Faktoren, wie z.B. Markttransparenz einen entscheidenden Einfluss auf die Preisbildung haben. Es können wertvolle Erkenntnisse abgeleitet werden, wie die knappen Mittel der öffentlichen Hand für eine effiziente Förderung eingesetzt werden können. In der zweiten Phase des Technologie-Monitorings, welche im Sommer 2003 angelaufen ist, werden folgende vier Technologien bezüglich der entscheidenden Einflussfaktoren für die wirtschaftliche Entwicklung und die Konsequenzen für die Energiepolitik genauer analysiert: Drehzahlvariable elektrische Antriebe, Lüftungssysteme für Niedrigenergiebauten, Membrantechnologie als

Alternative zu thermischen Trennverfahren und Modulttechnologie für Leichtbaufahrzeuge.

Der Energieversorgung wurden drei Projekte gewidmet. Im ersten wurden die **Optimierungschancen der dezentralen Stromversorgung** [5] untersucht. Das Ziel dieser Untersuchung war, Möglichkeiten und Auswirkungen einer verstärkt netz-unabhängigen Stromversorgung in *dezentralen Gebieten* zu prüfen und Vorschläge für Umsetzungsmassnahmen zu unterbreiten. Dazu wird in einem ersten Arbeitsschritt der Begriff *dezentrale Gebiete* geklärt und mit bestehenden raumplanerischen Kategorien verglichen. Ein *dezentrales Gebiet* liegt weit ab von der nächsten Trafostation, es muss eine grosse Distanz zum nächsten bestehenden Mittelspannungsanschluss überwunden werden und das Gebiet weist eine geringe Besiedelungsdichte auf. Mittels realer Kostendaten von 19 Fallbeispielen, alle in dezentralen Gebieten gelegen, werden die Kosten netzabhängiger Stromversorgung mit den Kosten netzunabhängiger, dezentraler Stromversorgung verglichen. Die Kosten netzunabhängiger Stromversorgung werden für jedes Fallbeispiel anhand von vier heute auf dem Markt erhältlichen Technologien berechnet: WKK, WKK-Verbund, WKK in Kombination mit Photovoltaik und lokale Wasserkraft. Es zeigt sich, dass bei den heutigen Kostenverhältnissen, die dezentralen Produktionstechnologien nur in wenigen Fällen kostengünstiger sind. Dabei hat sich die Distanz zur nächsten bestehenden Mittelspannungsleitung als wichtige Grösse herauskristallisiert, um abzuschätzen, ob dezentrale Lösungen als wirtschaftliche Alternative zur netzabhängigen Stromversorgung in Frage kommen.

In der zweiten Analyse wurde die **Versorgung mit fossilen Treib- und Brennstoffen** [6] untersucht. Ziel ist eine nüchterne Darstellung der Verfügbarkeit von Erdöl- und Erdgasressourcen. 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 Erdölieferländern die Preisvolatilität zunehmen wird.

Im dritten Projekt **Windenergie und Schweizerischer Wasserkraftpark** [7] zur Energieversorgung 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 Regelenergie 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 und deshalb geförderter) Windenergie bei einer Teilnahme der schweizerischen Kraftwerke an den geplanten Regelenergiemärkten die benötigte Ausgleichsenergie tendenziell günstiger.

In einem Projekt, das im Herbst 2003 begonnen wurde, werden die **Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse** [8] untersucht. Dabei geht es nicht nur darum, die bisherigen Input-orientierten Potenzialstudien zu ergänzen oder aufzudatieren, sondern vielmehr darum, die ganzen Nutzungsketten von der Ernte und Bereitstellung der verschiedenen Biomasserarten über die verschiedenen Konversionstechnologien bis hin zur Nutzung der gewonnenen Energie in Form von Wärme, Strom oder Treibstoffen zu untersuchen und zu bewerten. Die Abschätzung der energetischen Nutzungspotenziale und deren Wirtschaftlichkeit erfolgt im Vergleich zu den bestehenden fossilen Alternativen anhand von klar definierten Referenzobjekten und Anlagentypen. Zentrale Elemente dieser Potenzialstudie sind die neuen Technologien zur Gewinnung von Bio-Treibstoffen sowie der Einsatz von geographischen Informationssystemen zur Darstellung der kompletten Nutzungsketten anhand von Fallbeispielen.

In einem Projekt, das kurz vor Abschluss steht, wird das **Erneuerungsverhalten bei Wohn-**

bauten untersucht. In der Schweiz gibt es wenig detaillierte empirisch abgestützte Informationen über die quantitative und qualitative Erneuerungspraxis im Allgemeinen und hinsichtlich energetischer Aspekte im Besonderen. Dieses Projekt hatte zum Ziel, den Anteil der Gebäudesanierungen gegliedert nach energetischen und nicht-energetischen Instandsetzungen zu ermitteln und die Hintergründe und Motivationen zu analysieren.

Die wichtigsten inhaltlichen Fazits können wie folgt zusammengefasst werden: Die energetischen Erneuerungen im Vergleich zu nicht-energetische Erneuerungsarten ist bei den meisten Bauperioden und Bauteilen von geringerer Bedeutung. Das heisst, die Gelegenheit zu einer energetischen Erneuerung wurde in mehr als der Hälfte der Fälle nicht genutzt. Am häufigsten wurden in den letzten 15 Jahren die Fenster erneuert. Dies ist bei 40% bis 60% aller Gebäude mit Baujahr bis Mitte der 1970er Jahre der Fall. Zwar ist der Anteil der erneuerten Fassaden beinahe ebenso hoch wie bei den Fenstern, nämlich rund 35% bis über 50%, je nach Bauperiode. Hierbei handelt es sich aber meist nur um eine Instandsetzung ohne energetischen Effekt, d. h. um die Ausbesserung des Putzes und einen Neuanstrich. Eine Fassadenwärmehämmung erhielten nur rund 10% bis gut 15% aller untersuchten Gebäude. Eine Ausnahme bilden Mehrfamilienhäuser der Bauperioden 1947 bis 1975, die zu 25% bis 35% eine Fassaden-Dämmung erhielten.

Eine weitere Schlussfolgerung ist, dass kaum typische Gesamterneuerungspakete oder Erneuerungszyklen für bestimmte Bauteile zu erkennen sind. Den gewerblichen Unternehmen kommt bei der Gebäudeerneuerung eine grosse Bedeutung zu; diese Unternehmen sollten deshalb vermehrt Zielpublikum von Kampagnen sein. Als Anreiz für eine erhöhte Erneuerungstätigkeit wird am weitesten häufigsten die Möglichkeit von steuerlichen Abzügen genannt.

Im Projekt **Mobilisierung der Erneuerungspotentiale bei Wohnbauten** [9] geht man davon aus, dass der energetische Standard des Gebäudebestandes weit unter den heutigen technisch-wirtschaftlichen Möglichkeiten liegt. Bei Gebäudeerneuerungen wird zurzeit 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 zugehörigen

Massnahmen und Instrumenten entwickelt, um den Rhythmus und die energetische Qualität der Erneuerungen im Hinblick auf einen nachhaltigen Gebäudebestand zu beeinflussen.

Das Ziel der Vorstudie **Monitoring / Gebäudeenergiepass** [10] beinhaltet die Aufarbeitung der Grundlagen zur Erfassung effektiver und vergleichbarer Energiekennzahlen. Durch dieses Monitoring soll dank der erhöhten Markttransparenz ein Investitionsanreiz geschaffen und die Energie als Entscheidungskriterium gefördert werden. Die Monitoring-Thematik ist in den EU-Ländern wenig ausgeprägt. Schwergewichtig wird aber an der Einführung von Gebäudeenergiepässen gearbeitet im Hinblick auf die Einführung der EU-Richtlinie **Energieeffizienz in Gebäuden** im Jahr 2006 in den EU-Ländern. Relativ weit fortgeschritten sind diesbezüglich die Arbeiten in Dänemark.

Einem verwandten Thema widmet sich das Projekt **Internationaler Vergleich von Energiestandards** [11]. Im ersten Arbeitsschritt wurden die Bestimmungsfaktoren für Energiestandards fixiert. Diese lassen sich in den Dimensionen Genese, technische Ausgestaltung sowie Vollzug zusammenfassen. Für jede Dimension wurden Variablen gebildet, die es in der vergleichenden Analyse zu überprüfen gilt. Zusammen mit der Schweiz werden die Dimensionen mit vier Europäischen Staaten (Frankreich, Dänemark, Österreich und Deutschland) vergleichend dargestellt.

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** [12] untersucht. Es ist anzunehmen, dass auch im Bereich der Wirtschaftsbauten ähnliche, ebenfalls relativ grosse und kostengünstige Energie-Effizienzpotentiale bestehen, aber auch, dass aufgrund der komplexeren Gebäudehüllen und der vielfältigeren Nutzungsvielfalt gewisse Unterschiede zu den Wohngebäuden bestehen. Das Projekt hat deshalb zum Ziel, die Grenz- und Durchschnittskosten für die Anwendung energieeffizienter Massnahmen (Wärmeschutz sowie Heizungs- und Lüftungstechnik) für die wichtigsten Kategorien von Wirtschaftsbauten auf eine aktuelle empirische Basis zu stellen. Im Berichtsjahr wurden innerhalb des komplexen Untersuchungsgegenstandes Schwerpunkte gesetzt und der Gebäudebestand wurde 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** [13], welche sowohl bei Neubauten als auch bei Sanierungen untersucht werden. Dazu gehören unter anderem die Reduktion der Aussenlärmmissionen, bessere Raumluftqualität und höherer Wohnkomfort dank höherer Behaglichkeit (Innenraumtemperatur und -feuchtigkeit). Die Monetarisierung der Zusatznutzen werden durch die Zahlungsbereitschaft mit den beiden Methoden *Conjoint Analyse* und *Hedonic Pricing* ermittelt.

In zwei weiteren Projekten wurde die Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz von Gebäudekomponenten untersucht. Im Projekt **Kosten und Nutzen der Solarenergie bei energieeffizienten Bauten** [14] 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 wird 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.

In der ersten Phase des Projekts **Minergie-Module Solar/Holz und Wärmepumpen** [15] wurde mit einer breit angelegten Auslegeordnung der einzelnen Baukomponenten begonnen. 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 Gesamtbetrachtung und Modulansatz, Voraussetzungen bezüglich Ausbildung und Kommunikation, Voraussetzungen für Marketing und Akzeptanz).

MASSNAHMEN

Das abgeschlossene Projekt **Optimierung des Energievollzugs und Anwendung der SIA-Normen für Gebäude** [16] hatte zum Ziel, die Leistungsfähigkeit des Vollzugs der Energiegesetzgebung und den Stellenwert der Normen im Planungs-, Bau- und Vollzugsablauf zu untersuchen. Die Gründe für Vollzugsdefizite wurden analysiert und Verbesserungen, unter Einbezug von Aspekten des Haftungsrechts, vorgeschlagen. Die Normen von Fachverbänden definieren nicht nur Berechnungsmethoden und das Vorgehen im Planungs- und Bauprozess, sie können aus rechtlicher Sicht auf drei Arten Geltung erlangen: Als Ausdruck des Standes der Technik bzw. der anerkannten Regeln der Baukunde, durch vertragliche Verpflichtung diese einzuhalten und durch Verweisung des Gesetzgebers. Eine Verbesserung des energetischen Standards der Gebäude sollte, sobald ein mit bereits relativ geringem Vollzugsaufwand erreichbares Vollzugsniveau erreicht ist, mittels freiwilliger Massnahmen (z.B. Beratung, *MINERGIE* Standard, etc.) erreicht werden. Die Instrumente des Vollzuges und polizeiliche Massnahmen (Haftungsrecht, vernachlässigte Beratungspflicht etc.) sind nur wenig geeignet das generelle energetische Niveau der Bauten zu verbessern.

Der *Basler Stromspar-Fonds (SFB)* besteht aus einer Lenkungsabgabe auf Strom mit voller Rückverteilung an die Haushalte und die Unternehmen. Das Vorhaben hat für die Schweiz Pilotcharakter. Zum ersten Mal wurde im Energiebereich eine staatsquotenneutrale Lenkungsabgabe auf Strom eingeführt. Vom Stromspar-Fonds werden eine ganze Reihe positiver Wirkungen erhofft, insbesondere die Förderung einer energieeffizienten Wirtschafts- und Lebensweise durch die Energieabgabe und positive Wirkungen auf die Beschäftigung durch den Arbeitsplatzbonus. In der **Evaluation des Stromsparfond Basel** [17] wurde einerseits die Wirkungsweise von staatsquotenneutralen Lenkungsabgaben untersucht und andererseits die Übertragbarkeit des Basler Modells auf andere Gemeinden oder Städte geprüft. Die Wirkungen des *SFB* wurden in qualitativen und soweit möglich quantitativen Analysen ermittelt. Als Grundlagen dienen Interviews mit ExpertInnen aus Wirtschaft, Verwaltung und Politik, eine telefonische Befragung bei je 300 Haushalten und Unternehmen sowie eine detaillierte Auswertung der Basler Strukturdaten (Stromverbrauchsdaten, Wertschöpfungsdaten etc.). Die Entwicklung des Stromnachfrage seit Einführung des *SFB* deutet darauf hin, dass kurzfristig eher die untere Grenze des theoretischen Potentials

von 2.7% bis 8.2% ausgeschöpft werden dürfte. Dies bedeutet, dass der Stromverbrauch im Kanton Basel-Stadt innerhalb der nächsten zehn Jahre dank dem *SFB* nur um 8% anstatt 10% zunehmen wird. Die Übertragung des *SFB*-Modells auf andere Gemeinden oder Städte ist zweckmässig, falls deren Werke ähnliche Voraussetzungen erfüllen wie die *IWB* und im Rahmen der Einführung einer Lenkungsabgabe gleichzeitig die Preise senken würden. Falls diese Senkung nicht durchgeführt würde, hinge die Einführung vor allem von der politischen Akzeptanz ab.

In einer Untersuchung welche vom Bundesamt für Wohnungswesen mitfinanziert wurde, wurde analysiert, wie **Wohnraumförderung und Energieeffizienz** [18] in Einklang gebracht werden können. Das Risiko der Zusammenführung der Ziele von Wohnraumförderung und Energieeffizienz liegt darin, dass die Kosten der Massnahmen für mehr Energieeffizienz die Wirkung der Wohnraumförderung schmälern könnten: Verteuert die *Minergie*-Bauweise den Bau oder die Erneuerung, so widerspricht dies dem Ziel des preisgünstigen Wohnraums, d.h. die Mehrkosten mit ökologischem Ziel fressen einen Teil der Subventionen mit sozialem Ziel auf. Im schlechten Fall würde damit eine Win-Lose-Lösung entstehen. Die vorgeschlagenen Massnahmen müssen diesen Umstand berücksichtigen und die beiden berechtigten Anliegen in Einklang bringen. Neubauten, die durch die Wohnraumförderung unterstützt werden, müssen den *Minergie*-Standard in jedem Fall einhalten. Das ist verhältnismässig, weil jeder Neubau diesen Standard problemlos erreichen kann und ist einfach umzusetzen, weil es keinen bürokratischen Aufwand (Einzelfallabklärungen) auslöst. Bei den Erneuerungen kann das Verlangen des *Minergie*-Standards zu unverhältnismässigen Mehrkosten führen, weshalb man hier *Minergie* nicht vorschreiben sollte. Mit einem à fonds perdu-Betrag, der die maximalen Mehrkosten (10%) etwa zur Hälfte abdeckt, sollten die Eigentümer motiviert werden, den Standard zu erreichen. Die beschriebenen Fördermodelle gehen davon aus, dass zusätzliche Mittel zur Verfügung stehen müssen. Der Rahmenkredit für die Wohnraumförderung kann nicht dafür verwendet werden, weil dies nicht seinem Zweck entspricht. Die Verwendung von Mitteln aus dem Kredit für EnergieSchweiz ist problematisch, weil der Gebäudebereich eigentlich in die Zuständigkeit der Kantone fällt. Somit müsste ein Spezialkredit für diese Querschnittsmassnahmen von Wohnraumförderung und Energieeffizienz geschaffen werden.

Im Projekt **Planungs- und Bauinstrumente zugunsten einer CO₂-armen Wärmeversorgung** [19] wurden folgende Empfehlungen aufgestellt. Um das Massnahmenpaket *räumliche Prioritäten* umzusetzen, müssen die Kantone die (bedingte) Anschlusspflicht ans Fernwärmenetz rechtlich verankern und Gemeinden und Regionen eine Energieplanung zur räumlichen Koordination der Wärmeversorgung im Siedlungsgebiet und für Intensiv-Landwirtschaftszonen durchführen.

Um das Massnahmenpaket *MINERGIE* umzusetzen, braucht es einen allgemeinen Ausnützungsbonus für *MINERGIE*-Bauten, entsprechende Vorschriften in Sondernutzungsplänen und eine geeignete Ausnützungsdefinition, welche Bauten mit stark isolierten Aussenwänden nicht benachteiligt. Dazu müssen Bund, Kantone und Gemeinden Beiträge leisten.

Wie die energetische Sanierung von Altbauten am wirkungsvollsten gefördert und in Gang gesetzt werden kann, bedarf weiterer Abklärungen – ein entsprechendes Forschungsprojekt für *schlafende Bauten* ist bereits gestartet. Eine eigentliche Sanierungspflicht energetisch mangelhafter Bauten ist aus rechtlichen Gründen bislang nicht möglich. Deshalb sollen wenigstens Hemmnisse für energieeffiziente Ersatzbauten beseitigt werden.

Vereinbarungen sollen klare und harte Zielvorgaben anstelle zahlreicher Einzelmassnahmen mit hohem Vollzugsaufwand enthalten. Solche Zielvereinbarungen sind insbesondere bei grossen Bau- und Sanierungsvorhaben sowie im Rahmen von Sondernutzungsplänen mit nur wenigen Beteiligten zweckmässig.

Weitere empfohlene Massnahmen sind eine Wegleitung *Energie in Sondernutzungsplänen*, eine energetisch zweckmässige Definition der Geschossflächenziffer, die die Ausnützungsziffer ersetzen soll, und die Weiterbildung von Raumplanungsfachleuten in Energiefragen.

Die wenigen *Minergie*-Bauten in der Hotellerie lassen vermuten, dass für die Realisierung des *Minergie*-Standards noch verschiedene Hürden oder Engpässe bestehen. Im Projekt **Neubauen und Sanieren von Hotels im Minergie Standard** [20] werden deshalb insbesondere diese Engpässe analysiert, um in der Folge Massnahmen zu formulieren, diese zu eliminieren bzw. zu entschärfen. Damit sollen dem Bund, der – über das Gesetz zum Beherbergungskredit – Hotelbauten und –sanierungen unterstützen kann, und den weiteren angesprochenen Akteurguppen Ansatzpunkte zur Umsetzung von *Minergie* im

Bereich der Hotelbetriebe aufgezeigt werden, die von der *Schweizerischen Gesellschaft für Hotelkredit (SGH)* mitfinanziert werden.

Unter diesem Gesichtspunkt kann der *SGH* die Rolle zukommen, die Kreditnehmer für das Thema effiziente Nutzung von Energie zu sensibilisieren. Am meisten Erfolg versprechen dabei Aktionen, die dazu führen, dass die Bauherrschaft bei Projekten mit günstigen Voraussetzungen für den *Minergie*-Standard diese Chancen auch erkennen und das Projekt tatsächlich gemäss *Minergie*-Standard realisieren. Hierzu stehen folgende Stossrichtungen im Vordergrund: Hürden für die Prüfung der Realisierbarkeit des *Minergie*-Standards reduzieren, indem die *Minergie*-Planungskompetenz im Zusammenhang mit Hotelprojekten verbessert wird (z.B. Rechnungsmodelle anbieten) und Sicherstellen, dass bei allen Energie-relevanten von der *SGH* mitfinanzierten Projekten die Realisierung des *Minergie*-Standards geprüft wird (z.B. Machbarkeitsprüfung verlangen).

Die Untersuchung **Energieeffizienz und erneuerbare Energien - Pilotregion Surselva** [21] zeigt, dass die Potenziale vorhanden sind, bis 2050 die Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft zu erreichen (ohne Mobilität, welche nicht Bestandteil der Untersuchung ist). Es werden Massnahmen entwickelt und die erforderlichen finanziellen Anreize und deren Finanzierungsmöglichkeiten aufgezeigt. Die Hauptpotenziale finden sich bei der Verbesserung der Energieeffizienz von bestehenden Gebäuden und Neubauten, bei einem verstärkten Einsatz von Wärmepumpen, bei der Holz- und Sonnenenergienutzung sowie bei der stromeffizienten Beleuchtungen und Geräten. Es fehlt in der Region an Wissen und Information über die heute im Energiebereich vorhandenen Möglichkeiten. Durch die Schaffung eines Kompetenzzentrums soll diese Situation verbessert werden. Für die Umsetzung der Massnahmen ist in der Surselva ein starker politischer Wille notwendig.

Das Projekt **Best Practice – Marktordnung, Markttransparenz und Marktregelung** [22] beschäftigt sich mit der Durchsetzung energieeffizienter Lösungen am Markt im Baubereich. 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, 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. Folgende Ziele werden mit diesem Projekt im Detail verfolgt:

- Es wird geprüft, welche Hemmnisse der Durchsetzung von Best Practice Produkten im Bereich Bauen entgegenstehen.
- Massnahmen, die einer rascheren und umfassenderen Diffusion von Best Practice Technologien zum Durchbruch verhelfen, werden dargestellt und anhand der Kriterien Vollzug, Wirksamkeit, Effizienz und Akzeptanz bewertet.
- Empfehlungen zuhanden der wirtschaftspolitischen Akteure werden formuliert.

Gegenstand der laufenden Arbeiten sind eine umfangreiche Auswertung der existierenden Literatur, ein detaillierter Marktbeschreibung, Expertengespräche sowie Erhebungen.

Das Projekt **Aus- und Weiterbildung an den Hochschulen im Bereich Bau/Energie** [23] 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, um *Energie im Bau* in den Ausbildungsgängen zu thematisieren, 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 Auslegeordnung zeigt, dass die Strukturen vorhanden sind, um das Thema Energie noch besser in die Ausbildung zu integrieren. Es fehlen jedoch konkrete Hinweise, welche Wissens-Lücken geschlossen werden müssen. Zudem ist nicht klar, welche Bedürfnisse die Unternehmen an das Wissen der Studienabgänger haben. Diese beiden Punkte gilt es bei den weiteren Arbeiten zu klären.

INTERDEPENDENZEN

In der Rubrik Interdependenzen wurde im letzten Jahr das Projekt **Cluster Energie** [24] weitergeführt. 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.

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 interes-

sierten Fachverbänden in den Bereichen Stromversorgung und Bauen. Im vergangenen Jahr sind alle Projekte des Forschungsprogrammes 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.

Internationale Zusammenarbeit

In diversen Projekten sind internationale Hochschulinstitute oder Forschungsstellen direkt beauftragt oder im Rahmen von einzelnen Projekten einbezogen worden. Die Berücksichtigung der internationalen Forschungsliteratur und der rege Austausch an Fachkongressen, in Zeitschriften usw. stellt dabei eine Selbstverständlichkeit dar.

Es ist vor allem Aufgabe der Hochschulen sowie von privaten Forschungsstellen, eine Beteiligung am 6. EU-Rahmenprogramm in den Bereichen Energie und Nachhaltigkeit anzugehen. Es darf davon ausgegangen werden, dass es zu fruchtbaren Kooperationen kommen wird.

Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Im Jahr 2003 sind die Bereiche Kosten und Wirtschaftlichkeit von Energiesystemen sowie die Analyse von einzelnen Massnahmen intensiv und mit grossem Erfolg angegangen worden. So wurde zum Beispiel nach der Erhebung des Erneue-

rungsverhaltens bei bestehenden Gebäuden ein neues Projekt in Auftrag gegeben, um politische Massnahmen im Bereich Miet- und Steuerrecht zu untersuchen und vorzuschlagen. Weiter werden die Preisunterschiede, welche im Grenzkosten-

projekt bei Bauteilen aufgezeigt wurden, im Projekt *Best Practice* untersucht und entsprechender Handlungsbedarf aufgezeigt. Mit der allgemein verständlichen Broschüre **Wärmeschutz bei Wohnbauten – Kosten und Nutzen** [25] wurde ein Dokument geschaffen, das bei den Anwendern auf grosses Echo stösst.

Im Jahr 2004 wird das Hauptprojekt zur *Vision 2050* neu an die Perspektivearbeiten gekoppelt um Synergien zu nutzen. Der breitere Blickwinkel, der bei der *Vision 2050* verlangt wird, soll mit einzelnen Zusatzprojekten, v.a. im Bereich Verhaltensforschung, aber auch mit Bewertungsmethoden von Forschungsprojekten, gewährleistet werden. Da für das Jahr 2004 wesentliche Mit-

tel für die breit abgestützten Perspektivearbeiten reserviert sind, wird es nicht möglich sein, im letztjährigen Umfang Ausschreibungen durchzuführen. Dafür wird das Schwerpunktprogramm überarbeitet. Dabei ist eine neue Struktur der Forschungsthemen vorgesehen, da die alte Aufteilung nach Daten, Modellen, Wirtschaftlichkeit und Interdependenzen oftmals keine eindeutige Zuordnung zulies. Neu soll nach Anwendungssektoren entsprechend den Perspektiven unterteilt werden: Verkehr, Gebäude, Industrie, Energiebereitstellung und das übergeordnete Thema Energieforschung und Technologietransfer sowie die Energieperspektiven. Im neuen Programm EWG soll vor allem die empirische Forschung im Bereich Energiepolitik verstärkt werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2003 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

Sämtliche Jahres- und Schlussberichte können unter www.ewg-bfe.ch heruntergeladen werden.

- [1] R. Dettli, G. Gsponer und Y. Kaufmann, econcept, Zürich: **Erklärung der kantonalen Unterschiede von Energiekennzahlen bei Neubauten** (SB).
- [2] U. Brodmann & M. Berg (urs.brodmann@factorag.ch), Factor AG, Zürich und W. Ott (walter.ott@econcept.ch), econcept, Zürich: **Vision 2050 – Nachhaltige Energieversorgung und -nutzung** (SB).
- [3] H.P. Eicher & Reto Rigassi (reto.rigassi@eicherpauli.ch), Eicher+Pauli, Liestal: **Zukünftige Marktbedeutung von Klein-WKK-Anlagen** (SB).
- [4] H.P. Eicher & R. Rigassi (reto.rigassi@eicher-pauli.ch), Eicher+Pauli, Liestal; W. Ott, econcept, Zürich: **Technologie-Monitoring** (SB).
- [5] H. Sommer (sommer@ecoplan.ch), Ecoplan, Altdorf: **Dezentrale Stromversorgung -Optimierungschancen** (SB).
- [6] 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).
- [7] W. Ott (walter.ott@econcept.ch), econcept, Zürich: **Windenergie und Schweizerischer Wasserkraftpark** (SB).
- [8] B. Oettli (Bernhard.Oettli@infras.ch), Infras, Zürich, J.-L. Hersener, U. Meier, K. Schleiss, E. Gnassounou: **Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse** (JB).
- [9] W. Ott (walter.ott@econcept.ch), econcept, M. Jakob, CEPE, Zürich: **Mobilisierung der Erneuerungspotentiale bei Wohnbauten**
- [10] A. Baumgartner (andreas.baumgartner@amstein-walthert.ch), R. Sigg, Intep, Zürich: **Monitoring / Gebäudeenergiepass** (JB).
- [11] S. Rieder (rieder@interface-politikstudien.ch), Zürich, und W. Eichhammer, Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe (D): **Internationaler Vergleich von Energiestandards** (JB).

- [12] 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).
- [13] W. Ott (walter.ott@econcept.ch), econcept, M. Jakob, CEPE, *Zürich: Direkte und indirekte Zusatznutzen von energieeffizientem Wohnbau* (JB).
- [14] 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** (JB).
- [15] J. Gallati (justus.gallati@seecon.ch), M. Portmann, B. Zurfluh, *Luzern: Minergie-Module Solar/Holz und Wärmepumpen* (JB).
- [16] R. Dettli, P. Renaud, B. Signer & W. Ott (reto.dettli@econcept.ch), econcept, *Zürich* & P. Renaud, Planair, *La Sagne: Optimierung Energievollzug und Anwendung der SIA-Normen Gebäude* (JB).
- [17] R. Iten (rolf.iten@infras.ch), Infrac/PLAUT, *Zürich: Evaluation Basler Stromspar-Fonds* (SB).
- [18] P. Marti, I. Sidler & Ch. Brun (peter.marti@metron.ch), Metron, *Brugg: Wohnbauförderung und Energieeffizienz* (SB).
- [19] P. Renaud, (info@planair.ch), Planair, *La Sagne*; B. Hösli, (b.hoesli@hsp-planer.ch) und F. Gerheuser (frohmut.gerheuser@smile.ch), Polis, *Brugg: Planungs- und Bauinstrumente zugunsten einer CO2-armen Wärmeversorgung* (SB).
- [20] J. Kuster & P. Plaz (info@hanserconsulting.ch), BHP Hanser & Partner AG, *Zürich: Neubauen und Renovieren von Hotels im Minergiestandard* (SB).
- [21] H. Trachsel, (hansjoerg.trachsel@toscano.ch), E. Toscano AG, *St. Moritz* und R. Iten (rolf.iten@infras.ch), Infrac, *Zürich: Energieeffizienz und erneuerbare Energien – Pilotstudie Surselva* (SB).
- [22] E. Staehlin (elke.staehlin@bss-basel.ch), W. Hässig (Basler&Hofmann), *Basel und Zürich: Best Practice – Marktordnung, Markttransparenz und Marktregelung im Baubereich* (JB).
- [23] T. Lang (thomas.lang@km-marketing.ch), und M. Kunz, ZHW, *Winterthur: Aus- und Weiterbildung an den Hochschulen im Bereich Bau/Energie* (JB).
- [24] S. Suter & A. Müller (suter@ecoplan.ch), Ecoplan, Bern; F. Ohler & L. Jörg, Technopolis, *Wien: Cluster Energie* (JB).
- [25] E. Jochem und M. Jakob (martin.jakob@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, *Zürich: Wärmeschutz bei Wohnbauten – Kosten und Nutzen*, BBL Nr. 805.330.d

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
ZEN	Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit im Bauwesen, <i>Dübendorf</i>
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
LTC	Laboratorium für Technische Chemie
LTNT	Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien
LVV	Laboratorium für Verbrennungsmotoren
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 Bern
IBC	Institut für Biochemie
IAC	Institut für angewandte Chemie
	Université de Genève
CHIAM	Département de chimie minérale, analytique et appliquée
Cryst	Laboratoire de cristallographie
CUEPE	Centre universitaire d'études des problèmes de l'énergie
	Université de Neuchâtel
IMT	Institut de microtechnique
	Universität Zürich
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 Programmes)
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 Framework Programmes)
OECD / OCDE	Organisation for Economic Co-operation and Development / Organisation de coopération et de développement économiques

ORGANISATION DER FORSCHUNG / ORGANISATION DE LA RECHERCHE

	Bereiche / Domaines	BFE-Bereichsleiter Responsables de domaine à l'OFEN	Programmleiter / Chefs de programme	
			F + E / R + D	P + D
I. Rationelle Energienutzung / Utilisation rationnelle de l'énergie	Gebäude, Solararchitektur / Bâtiment, Architecture solaire	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-Koppelung (ohne Brennstoff- zellen) / 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	Pierre Renaud
	Photovoltaik / Photovoltaïque		Stefan Nowak	
	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	Bruno Guggisberg
	Kleinwasserkraftwerke / Force hydraulique			Manuel Buser
	Holz / Bois	Daniel Binggeli	Daniel Binggeli	
	Geothermie / Géothermie	Markus Geissmann	Harald L. Gorhan	
	Wind / Énergie éolienne		Robert Horbaty	
III. Kernenergie / Énergie nucléaire	Kerntechnik und nukleare Sicherheit / Technique et sécurité nucléaire	Christophe de Reyff ¹	Konstantin Foskolos (ad interim)	—
	Regulatorische Sicherheitsforschung / Recherche réglementaire en sécurité nucléaire		Brigitte Faust	—
	Kernfusion / Fusion nucléaire		Jean-François Conscience	—
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 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.brueiniger@r-brueniger-ag.ch

Manuel Buser

entec ag, Consulting & Engineering
 Bahnhofstr. 4, 9000 St.Gallen
 Tel. 071 228 10 20 – Fax : 071 228 10 30
 E-mail : manuel.buser@entec.ch

Jean-François Conscience

OFES, 3003 Bern
 Tel. 031 322 96 80 – Fax : 031 322 78 54
 E-mail : jean-francois.conscience@bbw.admin.ch

Max Ehrbar

Interstaatliche Hochschule für Technik
 Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs
 Tel. 081 755 33 96 – Fax : 081 756 54 34
 E-mail : max.ehrbar@ntb.ch

Brigitte Faust

HSK, 5232 Villigen - HSK
 Tel. 056 310 39 16 – Fax : 056 310 39 95
 E-mail : brigitte.faust@hsk.psi.ch

Konstantin Foskolos

PSI, 5232 Villigen – PSI
 Tel. 056 310 26 92 – Fax : 056 310 44 11
 E-mail : konstantin.foskolos@psi.ch

Harald L. Gorhan

Neudörfli 10, 5600 Lenzburg
 Tel. 062 891 83 68 – Fax : 062 891 83 68
 E-mail : harald.gorhan@bluewin.ch

Jean-Christophe Hadorn

Base Consultants SA, 51, ch. du Devin
 1012 Lausanne
 Tel. 021 651 42 82 – Fax : 021 651 42 83
 E-mail : jchadorn@baseconsultants.com

Robert Horbaty

ENCO AG, Wattwerkstrasse 1, 4416 Bubendorf
 Tel. 061 965 99 00 – Fax : 061 965 99 01
 E-mail : robert.hotbaty@enco-ag.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

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

Armin Reller

Universität Augsburg, Universitätsstr. 1,
 D - 86159 Augsburg
 Tel. 0049 8215983000 – Fax : 0049 8215983002
 E-mail : reller@physik.uni-augsburg.de

Pierre Renaud

PLANAIR SA, Crêt 108 A, 2314 La Sagne
 Tel. 032 933 88 40 – Fax : 032 933 88 50
 E-mail : pierre.renaud@planair.ch

Markus Zimmermann

EMPA-ZEN, 8600 Dübendorf
 Tel. 01 823 41 78 – Fax : 01 823 40 09
 E-mail : mark.zimmermann@empa.ch

Bundesamt für Energie BFE / Office fédéral de l'énergie OFEN

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen · Postadresse / adresse postale: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · www.admin.ch/bfe