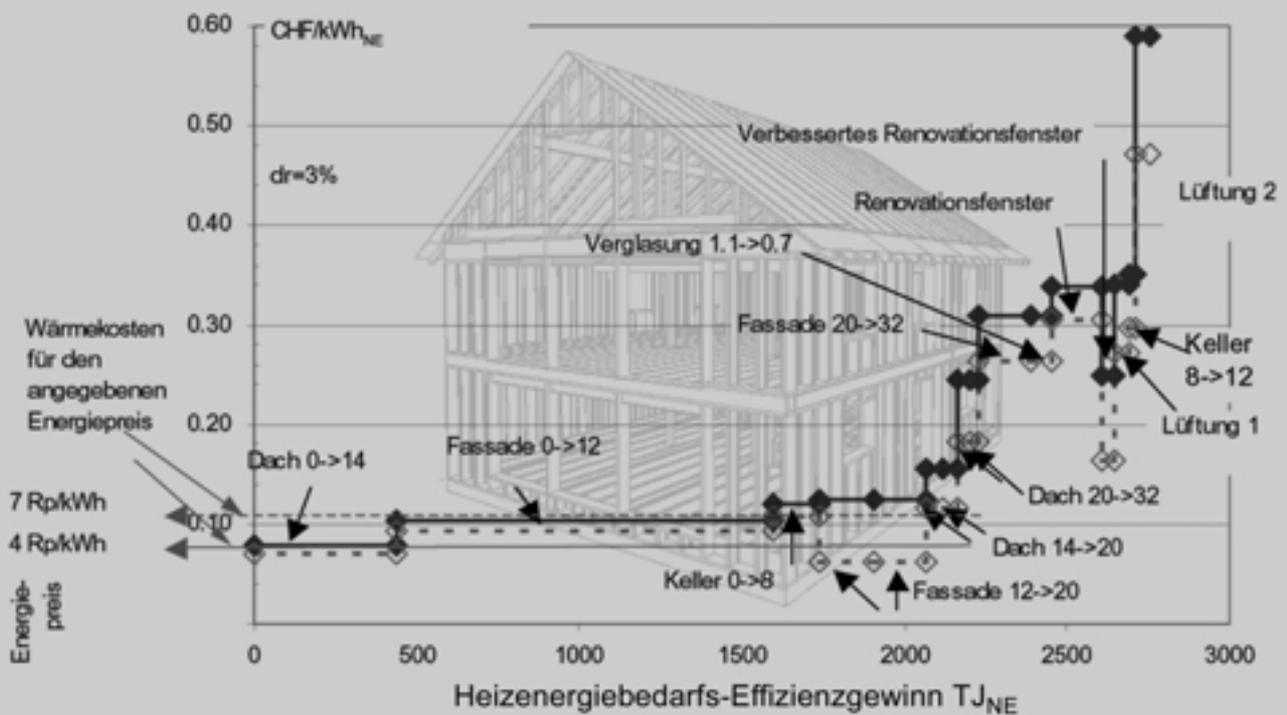


Energie-Forschung 2002 Recherche énergétique

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

31.05.2003

Vorwort / Avant-propos		3
Fortschritte der Energieforschung 2002 / Survol de la recherche énergétique en 2002		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	21
	Elektrizität	37
	Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung	49
	Brennstoffzellen	61
	Feuerung und Verbrennung	73
ERNEUERBARE ENERGIEEN / SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLES	Solaire actif: chaleur et stockage de chaleur	87
	Photovoltaik	105
	Solarchemie / Wasserstoff	123
	Biomasse	133
	Geothermie	145
	Windenergienutzung	159
Kleinwasserkraftwerke	169	
KERNENERGIE / ÉNERGIE NUCLÉAIRE	Nukleare Sicherheit und Entsorgung	177
	Regulatorische Sicherheitsforschung	193
	Fusion thermonucléaire contrôlée	203
ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN / FONDEMENTS DE L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE	Energiewirtschaftliche Grundlagen	211
Anhänge / Annexes		
Abkürzungen / Sigles		221
Energieforschungsorganisation (F+E & P+D) / Organisation de la recherche énergétique (R+D & P+D)		222
Wichtige Adressen / Adresses importantes		223

VORWORT

Die Energieforschung der öffentlichen Hand der Schweiz richtet sich nach dem *Konzept der Energieforschung des Bundes*. Für die Umsetzung des Konzepts ist das Bundesamt für Energie (BFE) zuständig. Es verfügt dafür über eigene Fördermittel, die subsidiär zu den Anstrengungen der privaten und öffentlichen Forschungsstellen eingesetzt werden. Die Betreuung der verschiedenen *Forschungs- und Entwicklungsprogramme* sowie der *Pilot- und Demonstrationsprogramme* obliegt 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 *Liste der Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprojekte im Bereich der Energie in der Schweiz* gibt Auskunft über die Aufwendungen der mit öffentlichen Mitteln finanzierten Energieforschung sowie eine detaillierte Zusammenstellung der Geldflüsse. Die Zahlen für 2002 liegen noch nicht vor, sie dürften allerdings kaum wesentlich von den 172 Mio. Franken des Vorjahres abweichen.

Der vorliegende Band enthält die Jahres-Überblicksberichte der BFE-Programmliter. 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 in gedruckter Form oder 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 2003

BUNDESAMT FÜR ENERGIE

Titelbild: *Brutto-Grenzkostenkurve für Einfamilienhäuser; siehe Programmbericht Energiewirtschaftliche Grundlagen (Bildquelle: BFE und © CIPRESSA 2001)*

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'office coordonne la recherche, le développement, la démonstration et le marketing. On trouvera, en annexe, un survol de l'organisation.

La *Liste des projets de recherche, développement et démonstration dans le domaine de l'énergie en Suisse* 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 totaux pour 2002 ne sont pas encore connus, mais ils ne devraient guère s'éloigner des 172 MCHF de l'année précédente.

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. Le présent document imprimé se limite aux rapports de synthèse des programmes. Les rapports finals (RF) des projets en version papier 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 2003

OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉNERGIE

Page de titre : *courbe des coûts marginaux bruts pour des maisons familiales ; voir le rapport du programme Fondements de l'économie énergétique.*

FORTSCHRITTE DER ENERGIEFORSCHUNG 2002

SURVOL DE LA RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE EN 2002

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

Im Rahmen der Energieforschungsprogramme des Bundesamts für Energie (BFE) wurden im Berichtsjahr rund 230 F+E- und 220 P+D-Projekte unterstützt. Die dafür eingesetzten Mittel von 35 Mio. Franken wurden dabei durch das Engagement 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 2002 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 und auch an vielen anderen Stellen berichtet wird. Erwähnenswert sind der Jahresbericht der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE, welcher die Arbeiten in einen weiteren Kontext stellt, sowie die ausführlichen Übersichten der 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 Entwicklung eines **Fassadenelements mit integriertem Latentwärmespeicher und Sonnenschutz** wurde nach ausgiebigen Tests in der EMPA-Solarprüfzelle abgeschlossen. In einer Spin-off Firma des Projekts werden diese Elemente demnächst in grossen Mengen produziert.

Mit dem Projekt *Modultec* zeigt die Firma *Horlacher*, wie **Fahrzeuge bei gleicher, oder verbesserter Sicherheit erheblich leichter und damit energie-sparender** gebaut werden können. Dank modularer Bauweise und Verwendung von Faserverbundstoffen – auch für statisch belastete Bauteile – kann eine Gewichtsreduktion von 30% gegenüber einem vergleichbaren Fahrzeug herkömmlicher Bauweise erreicht werden. Dank einer engen Zusammenarbeit mit *Rieter Automotive Management AG* finden diese Resultate Eingang in die Praxis.

Durant l'année 2002, ce sont près de 230 projets de R+D et 220 projets P+D qui ont été soutenus par les divers programmes de recherche énergétique de l'OFEN. Les moyens ainsi engagés (35 MCHF) se sont trouvés multipliés par l'engagement des institutions de recherche, 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 *Suisse-Energie*, ont continué à être une coopération fructueuse en 2002.

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, 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

Le développement d'un **élément de façade pourvu d'un stockage de chaleur latente et de protection solaire** a été achevé après des tests minutieux au LFEM/EMPA. Dans une firme *spin-off* du projet de grandes quantités de ces éléments vont être produits.

La firme *Horlacher*, dans le projet *Modultec*, a montré comment on peut réaliser des **véhicules plus légers et moins énergivores, ayant des caractéristiques de sécurité tout aussi bonnes sinon meilleures**. Cela peut se faire grâce un montage modulaire et à l'utilisation de matériaux en fibres – également pour les parties à charge élevée –, en permettant ainsi une réduction de poids allant jusqu'à 30%. Grâce à une étroite collaboration avec *Rieter Automotive Management SA* ces résultats trouvent maintenant leur chemin vers une application pratique.

Elektrische Antriebe und Motoren machen in der Schweiz rund 45% des Elektrizitätsverbrauchs aus. Sie bergen noch erhebliche Effizienzpotentiale. Zudem exportieren Schweizer Unternehmen in diesem Bereich erfolgreich. Die Firma *Technocon AG* hat einen Prototyp eines **hocheffizienten, getriebelosen Antriebs** für Anwendungen mit tiefen Drehzahlen entwickelt. Dieser besteht aus Umrücker und einer hochpoligen, permanent erregten Synchronmaschine. Gegenüber konventionellen Systemen mit Getriebe lassen sich die Verluste um ca. 40% reduzieren.

Über die Hälfte der kleinen **Wärmepumpen** nutzen Umgebungsluft als Wärmequelle, wobei wegen sporadischer Eisbildung am Wärmetauscher ca. 10% des Bedarfs an Elektrizität für das Abtauen verwendet werden muss. In einem Projekt mit der ETH-Lausanne wurden **nanostrukturierte wasserabweisende Beschichtungen**, welche eine Benetzung und somit die Eisbildung verhindern sollen, erfolgreich getestet. Nun wird die Beschichtung im realen Betrieb erprobt.

Im *BRESA-Projekt* unter Beteiligung des PSI, der beiden ETH, der Fachhochschule Biel, der *Montena SA*, von *VW* und der *Motorentchnik Aachen* konnte mit einer winterlichen Fahrt auf den Simplonpass die Entwicklung eines **Antriebsstrangs basierend auf Brennstoffzellen und Supercaps** für einen Personenwagen abgeschlossen werden. Das Fahrzeug erzielt über einen weiten Bereich des Betriebs einen Wirkungsgrad von mehr als 40%.

Am PSI wurde ein langjähriges Projekt zur Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur **Verminderung von NOx-Emissionen aus mobilen Dieselmotoren** mittels selektiver Reduktion durch Harnstoffkatalysatoren abgeschlossen. Die Resultate werden umgesetzt einerseits bei der Firma *Liebherr* in Bulle, die Motoren entwickelt, welche die strengen EURO IV- und V-Abgasnormen einhalten und andererseits bei einer Firma, welche die Katalysator-technologie vermarkten will.

ERNEUERBARE ENERGIEN

Das Institut für Solartechnik an der Fachhochschule Rapperswil wurde gemäss ISO-Norm 17025 als **Testlabor für Solarkollektoren und deren Bestandteile** akkreditiert. Die Normen EN 12975-1 und 2 traten 2002 in Kraft und werden vom Institut für Solartechnik angewendet. Abgestimmte Tests der europäischen Labors sind am Laufen. Arbeiten auf dem Gebiet **neuer Materialien und Gebäudeintegration** an der ETH-Lausanne haben zu einer Patentanmeldung geführt. Damit wird die industrielle Nutzung dieser Anwendung ermöglicht.

Les entraînements et moteurs électriques représentent 45% de la consommation d'électricité en Suisse et recèlent encore un potentiel d'efficacité considérable. Des entreprises suisses exportent déjà avec succès dans ce domaine. La firme *Technocon SA* a développé un prototype d'un **entraînement hautement efficace sans transmission**, prévu pour des applications à bas régime. Cet entraînement se compose d'un convertisseur de fréquence et d'une machine synchrone à aimant permanente multipolaires. Par rapport à des systèmes conventionnels avec transmission on s'attend à environ 40% de diminution des pertes.

Plus de la moitié des **pompes à chaleur** utilisent l'air ambiant comme source de chaleur, ce qui engendre un surcroît d'environ 10% de la consommation d'électricité pour le dégivrage en cas de formation de glace. Des **revêtements hydrophobes nanostructurés** qui empêchent le mouillage et par là la formation de givre, ont été testés avec succès à l'EPF de Lausanne. Ces revêtements sont maintenant mis en œuvre.

Dans le projet *BRESA*, avec participation du PSI, des deux EPF et de la HES de Bienne, la firme *Montena SA*, ainsi que *VW* et *Motorentchnik* à Aix ont pu réaliser un **système motorisé complet basé sur des piles à combustible et des supercapacités** intégrées à une voiture qui a franchi le col du Simplon durant l'hiver passé. Une efficacité de 40% a pu ainsi être atteinte.

Au PSI un projet de longue haleine s'est achevé qui a permis le développement d'un procédé original pour **l'abaissement des émissions de NOx provoquées par les moteurs diesel** grâce à une réduction chimique sélective au moyen d'un catalyseur à base d'urée. Il en est résulté un transfert technologique auprès de la firme *Liebherr* à Bulle. Celle-ci développe des moteurs qui suivent strictement les normes EURO IV et V en matière de gaz d'échappement. Une autre firme s'est engagée à mettre sur le marché cette technologie basée sur ce catalyseur.

SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLES

Dans le domaine du solaire thermique, le SPF de Rapperswil a été **accrédité** selon la norme ISO 17025 comme **Laboratoire de tests pour les capteurs solaires thermiques et leurs composants**. Les normes EN 12975-1 et 2 son entrées en vigueur en 2002 et le SPF les respecte. Des examens appropriés des laboratoires européens sont en cours. Dans le domaine des **nouveaux matériaux un développement original** a débuté à l'EPF de Lausanne. Ce projet fait l'objet d'une recherche en brevet et devrait déboucher sur une poursuite industrielle.

In einem dichtbesiedelten Land wie der Schweiz ist die **Integration von Photovoltaikmodulen** in vorhandene Strukturen – z.B. Gebäude – ein wichtiges Anliegen für den Einsatz dieser Technologie. Die kombinierte 283 kWp Photovoltaik-Beschattungsanlage am *Dock Midfield* des Flughafens Zürich ist ein besonders gelungenes Beispiel dafür. Die Anlage wurde mit dem Schweizer Solarpreis 2002 ausgezeichnet.

Moderne und zukünftige Energiesysteme basieren je länger je mehr auf der Verfügbarkeit und Beherrschbarkeit von Materialsystemen. Dies trifft auch auf gasförmige Energieträger und insbesondere auf den Wasserstoff zu. Die Schweiz hat in der Bearbeitung von Materialien eine lange Tradition und soll ihr Know-how für Energieanwendungen nutzen. Ein Beispiel dafür ist die Entwicklung von **plasmabeschichteten Polymeren zur Abdichtung von Wasserstoffspeichern** an der École d'Ingénieurs in Genf.

In Schaffhausen produziert eine Demonstrationsanlage **Fasern und Protein sowie Biogas und Ökostrom aus Gras**. Die weltweit erste Anlage dieser Art hat eine jährliche Verarbeitungskapazität von 5'000 t Trockensubstanz. Die Produkte werden zur Zeit erfolgreich in den Markt eingeführt.

Eine **2'302 m tiefe Erdwärmesonde** in Weggis liefert Raumwärme und Warmwasser für 40 Haushalte. Die dem Erdreich entnommene Wärmemenge wurde in den vergangenen Jahren wesentlich gesteigert. Eine detaillierte Messkampagne untersucht nun die Auswirkungen dieser Steigerung, um Erkenntnisse auch für andere Projekte zu sammeln und um die Nutzung optimal anzupassen.

Die **850-kWp-Windkraftanlage** oberhalb Andermatt gehört zu den höchstgelegenen weltweit und soll neue Erkenntnisse über den **Betrieb im Gebirge** bringen. Die Installation wurde im Sommer 2002 fertiggestellt und enthält mehrere innovative Komponenten von Schweizer Unternehmen, wie etwa den wartungsarmen Permanent-Magnet-Generator der Firma *Bartholdi* und den Stromumformer der Firma *Technocon*.

Mit zwei Doppelkonen in einer Wasserleitung kann eine Druckerhöhung ohne rotierende Teile generiert werden. Diese kann für die **Pumpspeicherung** an Standorten ohne Stromversorgung genutzt werden. Die *Kraftwerke Oberhasli* hat diese Anwendung im realitätsnahen Masstab getestet und optimiert.

KERNENERGIE

Im Bereich der **kontrollierten nuklearen Fusion** entwickelt die ETH-Lausanne ein 2-MW-1780-GHz-Gyrotron (**elektronische Heizung**) und arbeitet an der Kontrolle des Plasmas. Dies sind wichtige Beiträge zur Realisierung des internationalen Grossprojekts **ITER** (Fusions-Versuchsreaktor). Die ETH-Lausanne wurde unter den beteiligten Institutionen ausgewählt die Arbeiten am Heizsystem zu leiten.

La mise en œuvre de la technologie photovoltaïque dans un pays comme la Suisse, à forte densité d'habitation, passe par l'**intégration architecturale des modules photovoltaïques**. Le bâtiment *Dock Midfield* de l'aéroport de Zurich est pourvu de brise-soleil combinés avec des modules photovoltaïques d'une puissance installée de 283 kWc. Cette installation exemplaire a reçu le Prix solaire suisse 2002.

Les systèmes énergétiques actuels et du futur se basent de plus en plus sur la disponibilité et la maîtrise de systèmes de matériaux. Cela concerne aussi les agents énergétiques gazeux et particulièrement l'hydrogène. La Suisse a une longue tradition dans le travail des matériaux et peut utiliser son savoir-faire. Un tel exemple réside dans le développement, réalisé à l'École d'Ingénieurs de Genève, de **polymères par dépôt plasmatisque en vue de rendre étanche des réservoirs d'hydrogène**.

À Schaffhouse, une installation de démonstration produit **des fibres, des protéines ainsi que du bio-gaz et du courant verts à partir de végétaux**. Cette installation, qui est une première mondiale, a une capacité annuelle de 5'000 t de substance sèche. Les produits sont déjà mis sur le marché avec succès.

À Weggis une **sonde géothermique de 2'302 m** permet de fournir chaleur et eau chaude à 40 ménages. La quantité de chaleur tirée des profondeurs de la terre a fortement augmenté ces dernières années. Une campagne de mesure détaillée examine maintenant les effets de cet accroissement afin d'en tirer des enseignements pour d'autres projets et en vue d'en optimiser l'usage.

L'**installation éolienne de 850 kWc** sise au-dessus d'Andermatt est l'une des plus élevée au monde et doit apporter des connaissances nouvelles sur le **fonctionnement dans le domaine alpin**. Elle a été mise en fonction en été 2002 et est pourvue de plusieurs composants produits par des entreprises suisses, comme le générateur à aimant permanent ne nécessitant aucun entretien de la firme *Bartholdi*, et le convertisseur de fréquence de la firme *Technocon*.

Une élévation de pression sans élément tournant peut être produite grâce à deux doubles cônes situés dans une conduite d'eau. Cela peut être mis en œuvre pour du **stockage par pompage** là où il n'y a pas d'accès au réseau électrique. L'installation hydraulique de *Kraftwerke Oberhasli* a été testée et optimisée à une échelle proche de la réalité.

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Dans le domaine de la **Fusion thermonucléaire contrôlée** l'EPF de Lausanne a continué en 2002 de contribuer aux travaux préparatoires européens pour la construction du grand projet international **ITER** (un réacteur expérimental pour la fusion) et cela dans les domaines du **chauffage cyclotron électronique** (développement d'un gyrotron de 2 MW à 1'780 GHz)

Im Bereich **Kernspaltung** wurden am PSI erste Messungen mit hochaktiven Proben (**Hochabbrand Brennstoff**) durchgeführt. Der Verlauf der abnehmenden Reaktivität mit zunehmendem Abbrand konnte bestimmt werden. Des weiteren wurden umfangreiche **Analysen** durchgeführt, um das **Speisewasser-System** des Kernkraftwerks Leibstadt zu modifizieren; diese Änderungen haben sich bei einem Turbinenschnellschluss als richtig und zweckmässig herausgestellt. Ein internationales Konsortium wurde gegründet, welches Untersuchungen zum **Aerosolverhalten** beim Bruch von Dampferzeuger-Heizrohren begleitet. Erste Experimente am PSI zeigen, dass mit einem hohen Rückhaltevermögen von Aerosolpartikeln gerechnet werden kann.

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Im Projekt **Grenzkosten bei forcierten Energieeffizienz-Massnahmen** (siehe auch Titelbild des Berichts) konnte gezeigt werden, dass bei einer systematischen Planung grosse Energiesparpotentiale für Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie für Sanierungen und Neubauten erzielt werden können, die nahe an der Wirtschaftlichkeit sind. Werden weitere positive Effekte berücksichtigt wie Lärmschutz und Raumklima-Verbesserung, ergibt sich eine positive sozio-ökonomische Gesamtbilanz.

et du contrôle du plasma. Le CRPP a été choisi comme chef de file par les autres laboratoires européens qui sont en charge du développement et de la construction de ce système de chauffage d'ITER.

Dans le domaine de la **fission nucléaire**, les premières mesures faites au PSI avec des échantillons fortement activés (**combustible à haut taux de combustion**) ont été réalisées. On a pu suivre la réactivité décroissante liée au taux croissant de combustion. Des **analyses** complètes ont été exécutés pour modifier le **système d'injection d'eau** de la centrale de Leibstadt. Lors d'une fermeture brutale des turbines les modifications se sont avérées correctes. En 2002 a été fondé le consortium international qui va accompagner les expériences concernant le **comportement des aérosols** lors de la rupture des conduites de chauffage des générateurs de vapeur. Les premières expériences du PSI montrent que l'on peut compter avec un facteur de retenue élevé des particules d'aérosols.

FONDEMENTS DE L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE

Dans le projet consacré aux **coûts marginaux lors de mesures forcées d'efficacité énergétique** (voir aussi l'image sur la page de titre de ce document), on a pu montrer que, en cas d'une planification systématique, de grands potentiels d'économie d'énergie, et proches de la rentabilité, pouvaient être atteints, aussi bien pour des maisons individuelles et des locatifs, que dans les cas de rénovation et de nouvelle construction. Si d'autres effets positifs sont pris en considération, tels que protection contre le bruit ou amélioration du climat d'habitation, il découle encore un bilan global socio-économique positif.

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG IN GEBÄUDEN

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2002

Mark Zimmermann

mark.zimmermann@empa.ch

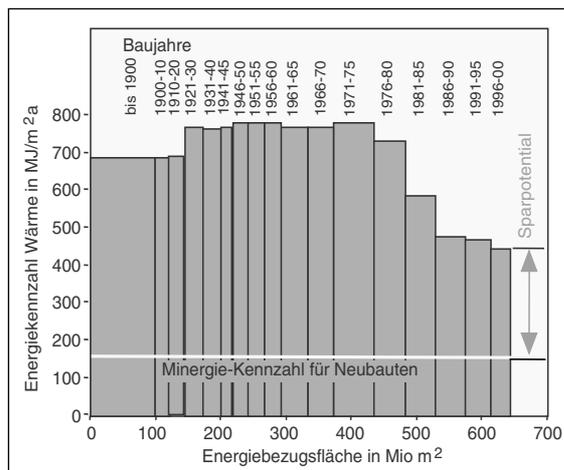


Mehrfamilien-Passivhaus Sunny Woods

Die Passivhaus-Technologie setzt sich auch in der Schweiz durch. Der jährliche Heizenergieverbrauch liegt bei weniger als 10 kWh/m² und mit einer Photovoltaikanlage auf dem Dach produziert dieses Haus mehr Strom als es verwendet. Es ist damit nahezu energieautark. Dafür wurde es mit dem schweizerischen und europäischen Solarpreis 2002 ausgezeichnet.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die **rationelle Energienutzung in Gebäuden** spielt eine bedeutende energie- und umweltpolitische Rolle. Währenddem bei der Energieeffizienz von Neubauten in den letzten Jahren grosse Fortschritte erzielt wurden (nicht zuletzt durch griffige Normen und Gesetze), besteht bei Altbauten noch ein gewaltiges Sparpotential.



Figur 1: Die Graphik zeigt die im Kanton Zürich gebaute Wohnfläche mit dem zugehörigen spezifischen Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser. Ab 1940 entspricht jedes Feld dem Energieverbrauch von Bauten einer 5-jährigen Bauperiode.

Das Programm **Rationelle Energienutzung in Gebäuden** [51] 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 **haustech-**

nischen Installationen und mit **der Nutzung der Sonnenenergie**. Im Vordergrund stehen die Optimierung ganzer Gebäudesysteme und die ganzheitliche Berücksichtigung der Umweltwirkungen. Währenddem früher Einsparung und Substitution von fossilen Energieträgern Vorrang hatten, stehen heute die Reduktion des Primärenergieverbrauchs und die Minimierung der Umweltbelastung im Vordergrund.

Anfangs 2000 wurde das Programm für 4 Jahre festgelegt und 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 als Neu- und Altbau im Wohn-, Büro- oder Gewerbebereich.
- **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 2002

UMWELTTECHNIK

Bauprozesse und der Betrieb von Gebäuden verursachen nicht nur grosse Abfallmengen, sie sind auch bei den Schadstoffemission und bei der Verursachung von Treibhausgasen ein wichtiger Faktor. Das Programm befasst sich deshalb auch

mit den Umweltwirkungen der Energienutzung und der Bauprozesse, mit Bewertungsmethoden und Instrumenten zur Beurteilung der Umweltwirkungen sowie mit der Verminderung von grauer Energie.

Diverse Institutionen des ETH-Bereichs haben sich unter der Leitung der EMPA zu einem **Zentrum für Ökoinventare** zusammengeschlossen und erstellen ein umfassendes und harmonisiertes Ökoinventar für Energiesysteme, Investitions- und Konsumgüter, Transporte und Entsorgungsprozesse. Mit dem Projekt **Ecoinvent 2000** werden Grundlagen bereitgestellt, mit welchen in Zukunft anwendungsorientierte Fragestellungen untersucht werden können. Die Arbeiten werden im Sommer 2003 publiziert. Für interessierte Anwender besteht eine Homepage unter www.ecoinvent.ch, auf welcher ab Juli 2003 auch Datensätze von Lebenszyklusanalysen herunter geladen werden können. Die Unterstützung des BFE konzentriert sich auf die **Bilanzierung der Energieträger** [1] sowie auf **Heiz- und Solarsysteme** [2]. Ergänzende Untersuchungen werden vor allem durch das BUWAL, das Bundesamt für Bauten und Logistik und das Bundesamt für Strassen unterstützt.

Bereits praxisbezogen ist das Projekt **eco-devis** [3]. In Zusammenarbeit mit verschiedenen kantonalen Hochbauämtern und der Bauwirtschaft werden Bauprozesse bezüglich ihrer Umweltverträglichkeit analysiert und in einem sogenannten **eco-devis** als ökologisch vorteilhaft oder weniger vorteilhaft beurteilt. Wo im bestehenden **Normpositionenkatalog** (NPK) der Bauwirtschaft solche empfehlenswerte Konstruktionen fehlen, werden neue Ausschreibungstexte formuliert, welche besser auf die Bedürfnisse des Umweltschutzes eingehen. Mit **eco-devis** hat der Bauplaner ein Instrument zur Verfügung, welches es ihm leicht macht, umweltfreundliche Baukonstruktionen in der Planung zu bevorzugen.

Im Projekt **Ökologische Optimierung von Solargebäuden über deren Lebenszyklus** [4] werden auf der Basis von Ökobilanzen, extrem energieeffiziente Gebäuden bezüglich ihrer Umweltwirkungen untersucht. Empfehlungen zur energetischen und ökologischen Optimierung werden für 2003 erwartet.

Um vermehrt nachwachsende Rohstoffe mit geringer grauer Energie einzusetzen, wurden mit der Dämmstoffindustrie **Wärmedämmungen aus Hanf- und Grasfasern** entwickelt [5]. Dämmstoffe aus Hanffasern konnten sich jedoch nicht durchsetzen. Sie sind bezüglich ihrer thermischen Eigenschaften, ihrer Verarbeitbarkeit und ihrer Kosten gegenüber alternativen Dämmstoffen wie Zelluloseflocken wenig vorteilhaft. Dagegen konnten mit Grasfasern, welche bei der Grasverarbeitung als Nebenprodukt (bei der Gewinnung von Protein und Ethanol als Energieträger) anfallen, gute Ergebnisse erzielt werden. Erste Bauten wurden damit bereits realisiert.

PASSIVE SONNENENERGIENUTZUNG / GEBÄUDESYSTEME

Da sich das Programm stark auf bestehende Bauten ausrichtet, steht weniger die Maximierung der Sonnenenergiegewinne, sondern die sorgfältige Abstimmung von Sonnenenergiegewinnen, Wärmebedarf, Beschattung und Kühlung im Sommer im Vordergrund.

Das IEA-Projekt **Solar Sustainable Housing** [6a] untersucht, optimiert und demonstriert im internationalen Rahmen Gebäude, welche rund 10 mal weniger Heizenergie benötigen als konventionelle Bauten. Nebst den technischen werden auch sozio-ökonomische Aspekte behandelt. Einerseits werden kostengünstige Lösungen gesucht, andererseits werden Bauherrenbedürfnisse ermittelt. Dazu wurde eine **Marktanalyse** gestartet [7], die untersucht, welches die Vorurteile und Wünsche von Bauherrschaften gegenüber Niedrigenergie-respektive **Passivhäusern** sind.

Zur Einführung des **Passivhaus**-Standards, welcher in Deutschland und Österreich schon weit verbreitet ist (www.passiv.de), wurde in der Schweiz der **MINERGIE®-P**-Standard entwickelt. **Passivhäuser** respektive **Minergie®-P**-Häuser benötigen jährlich nur noch etwa 30 – 35 MJ Heizenergie pro m² und können deshalb auf ein zentrales Heizsystem verzichten. Mit dem Projekt **Minergie® und Passivhaus: Zwei Gebäudestandards im Vergleich** [8a] wurde ein systematischer Vergleich der beiden Standards vorgenommen, und es wurde untersucht, wie mit einer SIA 380/1 kompatiblen Berechnung der Nachweis sowohl für **Minergie®**- als auch für den deutschen **Passivhaus**-Standard erbracht werden kann. Die Einführung des **Minergie®-P** erfolgte im Mai 2002.

Für verschiedene Gebäudekategorien mussten, nebst den Grenzwerten, **MINERGIE®-Zusatzanforderungen** [9] definiert werden, damit die massgeblichen Energieflüsse durch das Label gedeckt werden können. Im Rahmen einer Formularentwicklung für **MINERGIE®** wurde ein **Berechnungstool für einfache Lüftungsanlagen** [10] ins Nachweisformular integriert. Die Resultate sind in das elektronische **MINERGIE®**-Nachweisdokument eingeflossen. Zur Vereinfachung des **MINERGIE®**-Nachweises bei Wohnbauten wurden **Standardlösungen für den MINERGIE®-Nachweis** [11] entwickelt.

Die vielfältigen internationalen **Erfahrungen mit Passivhäusern und Solargebäuden** mit ähnlich niedrigen Energieverbräuchen werden in einer übersichtlicher Form dokumentiert [12] [6b]. Erste Ergebnisse sind bereits im Internet zugänglich: www.empa-ren.ch/ren/Solargebaeude.htm.

Für die noch wenig bekannten Luftkollektorsysteme soll 2003 eine **Planungsrichtlinie für solare Luftheizsysteme** [13] erscheinen. Sie wird die Erkenntnisse aus einem früheren IEA-Projekt und aus Anlagen in der Schweiz zusammenfassen.

Die Erfahrungen mit Luftkollektoren basieren nicht zuletzt auf dem viel beachteten **MehrfamilienPassivhaus** an der Rychenbergstrasse in Winterthur, wo eine ausführliche Messkampagne abgeschlossen werden konnte [14]. Die Messungen zeigen, dass wohl die energetischen Ziele erreicht werden, dass das System jedoch weiter vereinfacht werden sollte, um einerseits die Kosten zu senken und andererseits den Betrieb der Systeme zu vereinfachen.

Die ETH Zürich untersucht **Luftkollektoren kombiniert mit Photovoltaik** [15]. Da Photozellen nur etwa 15 % der Einstrahlung in elektrische Energie und 85 % in Wärme umwandeln, liegt es nahe, auch die anfallende Wärme zu nutzen. Das Projekt untersucht, inwiefern sich das Angebot an Wärme bezüglich Menge, Temperaturniveau und Verfügbarkeit mit geeigneten Systemen nutzen liesse. Abschliessende Ergebnisse sind Ende 2003 zu erwarten.

Mit der Nutzung der Sonnenenergie befassen sich auch drei Projekte aus der Westschweiz:

- Im Rahmen des IEA-Solar Task 23 wurden Methoden und Hilfsmittel zur **Optimierung der Sonnenenergienutzung in grösseren Gebäuden** erarbeitet [16]. Die Unterlagen sind auf einer eigenen Web-Site verfügbar: www.iea-shc.org/task23/index.html
- Im Zusammenhang mit der nachhaltigen Entwicklung städtischer Quartiere ist es interessant zu wissen, welches Potential mit Sonnenkollektoranlagen, Photovoltaikanlagen und mit Tageslichtnutzung effektiv ausgeschöpft werden könnte. Die ETH-Lausanne untersucht deshalb das **Solarpotential von Städten** [17a] anhand von drei exemplarischen Quartieren.
- Die ETH Lausanne beteiligt sich auch an einem IEA-Projekt zur **Optimierung der Tageslichtnutzung in Gebäuden** [17b]. Das Ziel ist die Erarbeitung von technischen Lösungsvorschlägen für die effiziente Kunst- und Tageslichtnutzung.

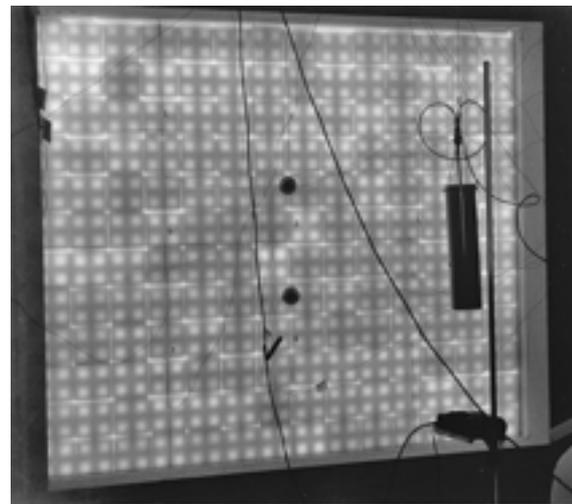
GEBÄUDEHÜLLE

Mit der laufenden thermischen Verbesserung der Gebäudehülle hat sich der Einfluss der Wärmebrücken verstärkt. Zur Einführung der Norm 380/1

wurden deshalb nicht nur die bisherigen Bauteilekataloge (Neubau und Sanierungen) überarbeitet, sondern auch ein umfangreicher, praxistgerechter **Wärmebrückenkatalog** [18] bereitgestellt. Alle drei Kataloge sind nun verfügbar.

Einen besonderen Schwerpunkt des Forschungs- und Demonstrationsprogramms stellen **Vakuumisolationen** dar, welche die Dämmdicke bei gleicher Leistung um einen Faktor 5 bis 10 reduzieren. Dadurch sind diese Systeme vor allem für Gebäudesanierungen und für die Isolation von Haushaltgeräten interessant, wo der Platz für dickere Dämmungen fehlt. Die Nachfrage nach solchen Hochleistungsdämmsystemen hat weiter zugenommen. Speziell für den Baubereich entwickelte, kostengünstige Vakuumisolationen sind für ausgewählte Anwendungen bereits verfügbar. Überall dort, wo der Raumverlust durch Wärmedämmungen berücksichtigt werden muss, stellen Vakuumisolationen bereits heute die wirtschaftlichste Lösung dar.

Die Schweiz führt auf dem Gebiet der **Hochisolationstechnik** ein internationales Projekt der IEA an [16a], mit welchem vor allem die Praxistauglichkeit dieser Dämmsysteme verbessert werden soll. Die Schweiz beteiligt sich mit verschiedenen Projekten an der Erarbeitung von Grundlagen und von Prüfmethode zur **Qualitätssicherung** [17a] sowie an der Entwicklung neuer **Applikationen** [8b].



Figur 2: Messungen im Solarprüfstand der EMPA haben gezeigt, dass die mit Parafinspeicher bestückte transluzente Fassade (Architekt D. Schwarz [35]) im Winter die Sonnenwärme gut einfängt, währenddem sie im Sommer einen guten Sonnenschutz bietet.

Im **Fassadenbereich** hat sich der Trend zu stark verglasten Fassaden fortgesetzt. Mit der **Pla-**

nungsrichtlinie für stark verglaste Bauten [21] wurde dem Planer ein Hilfsmittel bereit gestellt, mit welchem er rasch abschätzen kann, ob er den sommerlichen Wärmeschutz und den winterlichen Komfort in Fensternähe im Griff hat. Mit der Verbreitung der Erkenntnisse in einem zusammenfassenden **SIA-Merkblatt** [52] und einer detaillierten **SIA-Dokumentation** [53] kann ein hoher Bekanntheitsgrad bei Architekten und Ingenieuren erwartet werden.

Für komplexe Situationen und neue Fassadensysteme ist die genaue Kenntnis der **Wärme-lasten transparenter Bauteile und Sonnenschutzsysteme** notwendig. Diese werden am Solarprüfstand der EMPA gemessen und deren Charakteristik im Rahmen eines IEA-Projekts mit Simulationsprogrammen modelliert [20b]. Als aktuelle Untersuchung kann hier die Messung einer transluzenten Latentspeicherwand aufgeführt werden, welche bereits in einem Demonstrationsprojekt zum Einsatz kommt (Figur 2).

Von grosser Bedeutung ist auch die Dichtheit der Gebäudehülle, vor allem bei mechanisch belüfteten Gebäuden. Lüftungswärmeverluste und Bauschäden lassen sich nur wirksam vermeiden, wenn unkontrollierter Luftaustausch durch die Gebäudehülle verhindert werden kann. Bei *Passivhäuser* resp. *Minergie®-P* Gebäuden dient deshalb die Luftdichtigkeitsmessung 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. Die grössten Probleme stellen sich durch unkontrollierten Luftaustausch durch Lüftungskanäle, Cheminée-Kamine, Entlüftungen oder durch Verbindungen zu Nachbarwohnungen. Mit dem Projekt **Messung und Beurteilung der Luftdichtigkeit von Niedrigenergiehäusern** [22] wird deshalb die Messtechnik so verbessert und vereinfacht, dass sie sich auch zur Abnahme von Niedrigenergiehäusern eignet.

HAUSTECHNIK

Der Haustechnikschwerpunkt des Programms liegt bei der Entwicklung und Erprobung von **Planungs- und Simulationswerkzeugen für die Gebäudetechnik**.

- Nachdem mit der neuen Norm SIA 380/1: 2001 wichtige Fortschritte im thermischen Energiebereich gemacht wurden, waren auch zusätzliche Anstrengungen im Elektrizitätsbereich notwendig. Mit dem **Kältetool SIA 380/4 zur Bestimmung des Elektrizitätsbedarfs für Kälte und Lüftung** [23] wird

zusammen mit dem bestehenden Tool für Beleuchtung die vereinfachte Berechnung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden ermöglicht. Das Programm kann unter www.380-4.ch heruntergeladen werden.

- Bei der heute notwendigen Komplexität von Simulationsprogrammen ist es wichtig, dass die Programme bezüglich ihrer Zuverlässigkeit getestet werden. Im Rahmen des IEA *Solar Task 22* Projekts **Praxisnahe Validierung von Simulationsprogrammen** konnten wertvolle Erkenntnisse im Bereich der thermoaktiven Bauteilsysteme gewonnen werden [24]. Die getesteten Programme ergeben zum Teil recht unterschiedliche Resultate, wobei das bei uns oft verwendete Programm *TRNSYS* vertrauenswürdige Ergebnisse liefert. Insgesamt sind die Ergebnisse wohl unterschiedlich, in der Tendenz jedoch nicht widersprüchlich. Die vollständigen Berichte werden im März 2003 veröffentlicht.

Zwei wichtige Projekte befassen sich weniger mit der Gebäudetechnik selber, sondern mit der **Kompetenz des Bauherrn und des Betreibers**.

- Mit dem Projekt **Bestellerkompetenz im Bereich Gebäudetechnik** wird in Form eines elektronischen Handbuchs dem Bauherrn grösserer Anlagen gezeigt, worauf er als Besteller achten soll [25]. Das elektronische Handbuch enthält auch eine Reihe von Formularen, welche ihn befähigen, die Anforderungen an die haustechnischen Anlagen korrekt zu formulieren und zu dokumentieren. Dies erleichtert ihm die Kommunikation mit seinen Fachplanern wesentlich.
- Das zweite Projekt befasst sich mit der **Betreiberkompetenz**, die zwar auch schon bei der Bestellung zu berücksichtigen ist, die aber speziell den optimalen Betrieb komplexer haustechnischer Anlagen sicherstellen soll. Durch eine kontrollierte Inbetriebnahme und regelmässige Überwachung im Betrieb soll der Energieverbrauch haustechnischer Anlagen gesenkt werden. Die Arbeiten werden in internationaler Zusammenarbeit im Rahmen des IEA-Projekts **Commissioning of Building HVAC Systems for Improved Energy Systems** [26] durchgeführt.

Zwei Projekte befassen sich mit **Energiesystemen für Passivhäuser**. Durch den geringen Wärmebedarf entstehen neue Anforderungen und Möglichkeiten:

- Das Heizsystem gleicht häufig eher einer Energiezentrale als einem Heizkessel. Viel-

fach kommen sogenannte Kombigeräte zum Einsatz, welche das Haus nicht nur belüften, sondern auch beheizen und das Warmwasser bereitstellen. Die Effizienz dieser komplexen Systeme ist schwierig zu überwachen. An der HTA Luzern wird deshalb ein **Prüfstand für Kombigeräte** [27] erstellt, auf dem solche Geräte getestet und weiter entwickelt werden können.

- **Warmfluftheizungen in Passivhäusern** sind zwar sinnvoll aber in der Planung und Ausführung nicht ganz unproblematisch. Um zu erreichen, dass die neuen Möglichkeiten für Warmfluftheizungen optimal genutzt werden, wird zurzeit eine **Planungsrichtlinie** erarbeitet [28a], welche auch die Problematik von Holzöfen in Niedrigenergiehäusern behandelt.

Nicht ganz *Passivhaus*-tauglich aber interessant für **energie technische Sanierungen** wären sogenannte **Abluftsysteme**. Bei Sanierungen fehlt häufig der Platz zum Einbau einer Lüftungsanlage mit Zu- und Abluftkanälen. Abluftsysteme saugen deshalb die Aussenluft gezielt über die Fassade an

und führen die verbrauchte Luft über das meist vorhandene Abluftsystem wieder ab. Die durchgeführten Untersuchungen [28b] zeigen, dass eine dichte Gebäudehülle (die bei Sanierungen meist nur schwierig zu erreichen ist) die Voraussetzung für eine gezielte Luftführung wäre. Abluftsysteme werden deshalb mechanische Lüftungen mit Zu- und Abluftführung kaum ersetzen können.

Eines der wenigen Projekte, die sich noch mit der Optimierung konventioneller Heizungstechnik befasst, untersucht den praktischen Einsatz von kondensierenden Heizkesseln. Mit dem Projekt **Feldanalyse von kondensierenden Gas- und Ölfeuerungsanlagen** [19b] werden je fünf Geräte im praktischen Einsatz getestet. Damit soll vor allem die Frage beantwortet werden, wie kondensierende Kessel in der Praxis betrieben werden und ob sich der notwendige zusätzliche Energieaufwand für den Ventilator überhaupt lohnt. Dazu werden unter anderem Wirkungsgrad, Kondensationsmenge und zusätzlicher Stromverbrauch detailliert erfasst und ausgewertet.

Nationale Zusammenarbeit

Von den laufenden 34 vom BFE unterstützten Forschungsprojekten werden 12 Projekte mit **Fachhochschulen**, 10 Projekte mit **ETH-Instituten** und 8 Projekte mit der **Industrie** durchgeführt. An 21 Projekten sind planende **Ingenieurbüros** beteiligt und in 7 Projekten wird mit **Branchenverbänden** zusammengearbeitet.

Im Umweltbereich findet mit verschiedenen Bundesämtern eine enge Kooperation statt. Die Aktivitäten werden im Rahmen der **Koordinationsgruppe des Bundes für Energie- und Ökobilanzen**, in welcher nebst dem BFE das BUWAL, das BBL und das ASTRA vertreten sind, abgesprochen und zurzeit vor allem im Rahmen des Projekts *Ecoinvent* gemeinsam finanziert. Eine nächste Zusammenarbeit ist auf dem Gebiet der

externen Kosten geplant, die 2003 in ein grösseres Projekt münden soll. Die externen Kosten sollen systematisch und möglichst vollständig für alle in *Ecoinvent* erfassten Prozesse bestimmt werden. Mittelfristig erhofft man sich daraus Instrumente, welche die Kombination von Wirtschafts- und Umweltmodellen vereinfachen.

Die Zusammenarbeit der Fachhochschulen mit der KTI konnte verbessert werden. Neue Impulse sind diesbezüglich von der Gründung des **BRENET-Netzwerks** (*Building and Renewable Energies Network of Technology*, www.brenet.ch) unter der Leitung der HTA Luzern ausgegangen. Seit Sommer 2002 ist dieser Zusammenschluss vom Bundesrat als nationales Kompetenznetzwerk für Gebäudetechnik und erneuerbare Energien anerkannt.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Forschungszusammenarbeit dient primär dem wissenschaftlichen Erfahrungsaustausch und der Harmonisierung der Bestrebungen um Energieeffizienz.

In den **IEA-Programmen Energy Conservation in Buildings and Community Systems (BCS)**

und **Solar Heating and Cooling (SHC)** war die Schweiz 2002 an sieben Projekten engagiert.

- **Building energy analysis tools, SHC Task 22**, Abschluss März 2003 [24]
- **Optimisation of solar use in large non residential buildings, SHC Task 23**, Abschluss 2002[16]

- **Performance assessment of solar building envelope components**, SHC Task 27, Abschluss 2003 [20a]
- **Sustainable solar buildings**, SHC Task 28, Abschluss 2005 [6]
- **Daylighting buildings in the 21st century**, SHC Task 31, Abschluss 2005 [17b]
- **High performance thermal insulation systems**, BCS Annex 39, Abschluss 2004 [19a]
- **Commissioning of building HVAC systems for improved energy performance**, BCS Annex 40, Abschluss 2004 [26]
- **EVAPCOOL: Passive down draught cooling – development of key components** (Borth, Axima Lab AG)
- **SOLAR LOUVRE: Solar louvre building integrated collector** (Borth, Axima Lab AG)
- **IQ-Test: Improving quality in test and evaluation procedures of solar and thermal performances of building components** (Frank, EMPA)
- **RESHYVENT: Cluster project on demand controlled hybrid ventilation in residential buildings with specific emphasis of the integration of renewables** (Dorer, EMPA)

Die Projekte des 4. EU-Rahmenprogramms sind alle abgeschlossen. Im **5. EU-Rahmenprogramm** ist die Schweiz im Gebäudebereich zurzeit an 12 Projekten beteiligt:

- **IDEA: Interactive database for energy-efficient architecture** (Weber, Université de Genève)
- **INVENTNET: Network of industrial ventilation** (Dorer, EMPA)
- **DIAL-EUROPE: European integrated daylighting design tool** (Scartezzini, EPFL und Paule, Estia Sàrl)
- **EnerBuilt RTD: Energy in the built environment** (Toggweiler, Enecolo AG)
- **URBVENT: Natural Ventilation in Urban Areas, potential assessment and optimal façade design** (Roulet, EPFL und Borth, Sulzer Infra)
- **HOPE; Health optimisation protocol for energy-efficient buildings: pre-normative and socio-economic research to create healthy and energy-efficient buildings** (Foradini, E4tech Sàrl)
- **RE-FRAME: New window framing technologies for aerogel and other highly insulating glazings** (Schneider, Ernst Schweizer AG)
- **WINDAT: Windows as renewable energy sources for Europe – window energy data** (Frank, EMPA)

Das **6. EU-Rahmenprogramm** wurde Ende 2002 mit einer ersten Projektausschreibung gestartet. Im Gebäudebereich steht das Programm **Eco-Buildings** im Vordergrund, an welchem sich verschiedene Schweizer Partner zu beteiligen versuchen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die Ankoppelung der P+D-Projekte an die Forschungsschwerpunkte hat sich bewährt. Erstaunlich ist, wie gut sich der *Passivhaus*-Standard im Mehrfamilienhausbau eingeführt hat. Dies liegt sicher auch daran, dass für eine Zertifizierung Luftdichtigkeitsmessungen notwendig sind und der Bauherr damit eine geprüfte Qualität erhält.

2002 konnten diverse P+D-Projekte abgeschlossen und neue Projekte bewilligt werden.

Bei der **Ökosiedlung Melchrüti** (Wohnpark Balance) in Wallisellen wurde aus 61 untersuchten Wohnungen eine detailliert ausgemessen. Im Wesentlichen haben sich die Prognosen bestätigt: Der Energieverbrauch erreicht *Minergie*®-Standard und der Betrieb der Luftheizung hat sich

bewährt. Der Mehrverbrauch von rund 100 % in einer Wohnung ist vor allem auf das Benutzerverhalten zurückzuführen. Im Schlussbericht wird auch auf Verbesserungsmöglichkeiten beim Gebäude und bei der Haustechnik hingewiesen [31a]. In der Zwischenzeit wurden bereits weitere 34 Wohneinheiten in Uster und 57 in Fällanden erstellt.

Beim **Niedrigenergiehaus Erlenbach** [32] wurden Verbesserungen nach der ersten Messkampagne durchgeführt. Leider liegt der Energieverbrauch immer noch zu hoch. Der Bauherr untersucht zusammen mit der EMPA die Ursache für die Abweichung vom prognostizierten Wärmeverbrauch.

Das Messprojekt **Niedrigenergiehaus Grasswil** [29] wurde wegen Nachbesserungen erst 2002 fertig ausgemessen. Es bestätigte sich die Erkenntnis aus früheren Projekten, dass die Einbindung eines Holzofens in ein Komfortlüftungssystem regeltechnisch äusserst schwer zu bewältigen ist. Der Ofenbauer selber hat als Folge daraus ein Holzheizsystem entwickelt, worin die Wärme nicht direkt an die Luft abgegeben, sondern an ein hydraulisches System übertragen wird, welches an den Holzofen gekoppelt ist.

Der *Passivhaus*-Standard wird bei den Projekten: **1. Schweizerischer Wohn- und Gewerbebau im Passivhaus-Standard** (Rapperswil) [34], **Wohnen in Sunny Woods** (Zürich) [31b], **Passiv-Acht-Familienhaus** (Stans) [36] und **Passiv-MFH Stämpfli** (Unterägeri) [38] näher untersucht. Die Messungen werden 2003 abgeschlossen. Bereits jetzt zeigt sich, dass der ehrgeizige *Passivhaus*-Standard praktisch keine Fehler in der Planung und Ausführung zulässt und deshalb verschiedene Nachbesserungen notwendig sind.

An der HTA Luzern wurde das Projekt **Newspirit** [44] entwickelt, bei welchem der *Passivhaus*-Standard bei einem Leichtbaugebäude in Metallbauweise angestrebt wird. Der Swissbau-Auftritt 2002 wurde mir bescheidenen Mitteln unterstützt. Ein 1:1-Modell mit verschiedenen innovativen Komponenten wurde in einer Sonderschau vorgestellt.

Abgeschlossen ist das Projekt **TWD-Fassadenelement mit integriertem Latentspeicher und Sonnenschutz** (Ebnet-Kappel) [35]. Messungen, u. a. in der Solarprüfzelle der EMPA, bestätigen das Funktionieren des von D. Schwarz entwickelten Konzepts. In einer Spin-off-Firma dieses Projektes werden demnächst Latentspeicherelemente in grossen Mengen produziert, so dass sich die Kosten deutlich reduzieren lassen.

Das Projekt **Passivhaus im Umbau** [37a] an der Magnusstrasse erfüllt zwar nicht ganz alle Rahmenbedingungen für ein *Passivhaus* (U-Werte, Luftdichtheit), doch soll der Energieverbrauch den Standard erreichen. Die Messungen dauern bis 2003. Ein erster Zwischenbericht zeigt jedoch auf, dass die angestrebten Werte praktisch erreicht werden. Der Energieverbrauch für das Warmwasser liegt etwas unter den Prognosen, der Heizwärmeverbrauch leicht darüber. Nach ersten Messungen konnten bereits Verbesserungen vorgenommen werden. Hervorzuheben sind die Verbesserung der Dichtheit der Gebäudehülle und der Verzicht auf den Umluftbetrieb. Aufgrund der Thermik liegt die Temperatur in der Erdgeschosswohnung unter derjenigen der darüberliegenden Geschosse.

Das **Passiv-Mehrfamilienhaus Stämpfli** [38] konnte im Jahr 2002 fertiggestellt werden. Der *Passivhaus*-Standard wurde wegen der komplexen Gebäudeform nur mit grossen, vor allem finanziellen Aufwendungen erreicht. Die HTA Luzern führt zur Zeit Messungen durch, welche im Sommer 2003 in den Schlussbericht integriert werden.

Das **Zweifamilienhaus „Im Tal“ mit Duplex WP für Heizung und Warmwasser** [39] in Barga ist das erste *Passivhaus* im Kanton Schaffhausen. Eine Wärmepumpe, die im Wasch-/Trocknungsraum die Luft entfeuchtet und Wärme über die erdberührten Bauteile aus dem Erdreich bezieht, ist als Gesamtsystem in die Erfolgskontrolle eingebunden. Wegen technischer Probleme erreicht das Duplex-Gerät die angestrebten Leistungszahlen nicht. Die Wärmepumpe wurde bereits ausgewechselt, die Steuerung wird anfangs 2003 optimiert.

Ein weiteres **Zweifamilienhaus**, das ebenfalls nahe an den *Passivhaus*-Standard herankommt, wird **im Tessin** ausgemessen [40]. Es erreicht mit relativ einfachen architektonischen Mitteln und einem guten Wärmeschutz einen sehr geringen Energieverbrauch bei sehr gutem Wohnkomfort im Sommer wie im Winter. Das Projekt soll auch dazu dienen, die Vorteile der Niedrigenergiebauweise im Kanton Tessin besser bekannt zu machen.

Das innovative Projekt **Wellness Wärmerückgewinnung Brauchwarmwasser** [41] zeigt auf, wie mit einfachen Mitteln Energie aus Bädern mit hohem Warmwasserverbrauch in einem Speicher zwischengelagert und nutzungsabhängig wieder für die Vorwärmung genutzt werden kann. Das Messprojekt wird im Frühjahr 2003 abgeschlossen. Zwischenresultate wurden am Status-Seminar [55] 2002 präsentiert.

Die vollflächige **Integration eines solaren Luftsystems und einer PV-Anlage** [42a] in Braunwald demonstriert, wie selbst bei einer Gebäudesanierung mit einfachen Mitteln solare Komponenten in ein Haustechnikkonzept eingebunden werden können. Die zur Verfügung stehende südgerichtete Dachfläche kann vollständig für ein konvektives Luftsystem genutzt werden. Durch die Integration der Warmwasseraufbereitung in das Luftsystem wird die Sonnenenergie ganzjährig genutzt. Der Schlussbericht wird Ende April 2003 vorliegen.

Beim Projekt **Integration einer konvektiven Fassade in ein Heimatschutzobjekt** [42b] in Herisau kann sehr gut gezeigt werden, dass der *Passivhaus*-Standard und die Solarnutzung durchaus mit einer Bauweise verträglich ist, wie sie die

Denkmalpflege vorschreibt. Die Demonstration einer grossflächigen Sonnenenergienutzung bei einem Objekt, welches strengen architektonische Auflagen genügen muss, ist für den traditionellen Baustil in Appenzell neu. Der Schlussbericht wird Ende Februar 2003 vorliegen.

Das Projekt **Wohnüberbauung NiedrigstEnergieHäuser Stäfa** [43] basiert auf dem Wettbewerb für thermisch optimierte Unterkonstruktionen für hinterlüftete Fassaden. Der Preisträger rüstete 1340 m² Fassadenfläche mit einem neuartigen Ankersystem aus. Aufgrund der geringeren Anzahl Anker kann die Wärmebrückenwirkung deutlich reduziert werden. Die Ausführung ist dokumentiert und wurde am Status-Seminar 2002 vorgestellt.

Mit dem Projekt **Phönix light – Heizen und Kühlen mit PCM** (Phase Change Material) [45] sollen die rechnerischen Grundlagen geschaffen werden, um die Einbindung von PCM-Material in Lüftungsanlagen zu dimensionieren. Bei Bauten ohne oder mit wenig thermisch wirksamer Speichermasse kann die Anwendung von PCM die Haustechnik unterstützen. Messungen am Klimagerät *Clima Cooler*, eingesetzt am *Eye-Catcher* in Basel, zeigten, dass für unsere Breitengrade ein Latentspeichermaterial mit einem Schmelzpunkt um 21°C am geeignetsten ist.

Abgeschlossen werden konnte das Projekt **Offene Eisbahn mit Kälteträger CO₂** [46] in Ascona. Die Umstellung auf CO₂ als Kälteträger hat sich bewährt. Die Messungen haben gezeigt, dass der grösste Teil des Energieverbrauchs für das Aufeisen am Saisonstart auftritt. Dank Kontakten aus dem laufenden Projekt *Deckenstrahlung in Eishallen und überdeckten Eisfeldern* [47] wurde die Gemeinde Ascona auf die Möglichkeit aufmerksam gemacht, eine Überdeckung günstig anzuschaffen.

Das Projekt **Deckenstrahlung in Eishallen und überdeckten Ausseneisfeldern** [47] hat die erste Phase hinter sich. Der IR-Strahlungsaustausch zwischen einer Eishallendecke und dem darunter liegenden Eisfeld lässt sich beträchtlich reduzieren, wenn die Deckenuntersicht aus strahlungsreflektierendem Material (z. B. blankes Metall) besteht. Dadurch lassen sich Energieeinsparungen (Wärme und Kälte) von bis gegen 30 % realisieren. Mit dem vorliegenden Projekt werden die rechnerisch ermittelten Einsparungen am realen Objekt messtechnisch untersucht.

Folgende neue Projekte wurden 2002 bewilligt:

Wohn- und Geschäftshaus Renggli in Sursee [48], ein mehrgeschossiges Gebäude in Holzbau-

weise welche den *Passivhaus*-Standard anstrebt. Wegen der schwierigen Grundstücksbedingungen konnte das Gebäude nicht so kompakt gebaut werden, dass es *Passivhaus*-Standard erreicht.

Beim **Wohnhaus mit Atelier Schmoelzer** in Pratteln [49] werden innovative Techniken wie beispielsweise PV-Schiebeläden eingesetzt, um eine hohe Tageslichtautonomie und trotzdem keine Überhitzung im Sommer zu erhalten. Das Gebäude im *Passivhaus*-Standard wird 2003 fertiggestellt werden.

Das **Minergie®-P-Gebäude mit Gratec und Luftkollektorsystem** [42c] in Degersheim knüpft an die Erfahrungen mit Luftkollektoren aus früheren P+D-Projekten an (*Gratec*: Grassefaserisolation). Neu ist ein optimal angestellter, dachintegrierter Kollektor, der quer durchströmt wird, eine Luftverteilung mit integrierter Warmwassererwärmung, multifunktionale Steigzonen und eine neuartige Lüftungssteuerung.

Die bescheidenen Resultate einer Erfolgskontrolle des **Synergieparks für erneuerbare Energien** [33] (Gams) ist durch eine detailliertere Messung ergänzt worden: Mit der **Datenerfassung Synergiepark für erneuerbare Energien** [50] können aufbereitete aktuelle Daten aus dem Synergiepark online abgerufen werden. Ab November 2002 wurde eine Internetseite www.synergiepark.ch aufgebaut, welche Ende Februar 2003 freigeschaltet wird.

Gleich zwei Projekte für Sanierungen, welche den ambitionösen *Passivhaus*-Standard anstreben, wurden bewilligt. Beim **Umbau Nietengasse 20 - mit bestehender Backsteinfassade** in Zürich [37b] kommen Vakuumdämmelemente zum Einsatz, da die strassenseitige Fassade aus denkmalpflegerischen Gründen erhalten bleiben soll. Bewährte Techniken, welche beim vorangegangenen Projekt Magnusstrasse eingesetzt wurden, werden nochmals verbessert. Dank minimalem Baustoffumsatz und Trockenbauweise soll die Umbauzeit bereits im Frühsommer abgeschlossen sein. Nur wenige Gehminuten davon entfernt steht das Projekt **Zwinglistrasse 9+15** [37c]: Zwei Gebäude aus dem 19. Jahrhundert, welche als Blockrandbebauung mit Bruchsteinmauerwerk errichtet wurden, müssen saniert werden. Die Lücke zwischen den Häusern wird bis auf eine Durchfahrt gefüllt, um damit günstige Voraussetzungen zu schaffen, dass auch bei einer Sanierung der *Passivhaus-Standard* erreicht wird. Dank hohem Wärmedämm-Standard und guter Luftdichtheit, kombiniert mit einfacher, aber effizienter Haustechnik wird dieses Projekt die Vorgaben mit hoher Wahrscheinlichkeit erfüllen.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Die laufende Programmperiode 2000 – 2003 geht ihrem Ende entgegen. Mit der Zwischenausschreibung anfangs 2002 konnte das Programm in drei Bereichen auf aktuelle Bedürfnisse ausgerichtet werden:

- **Verstärkung der Anstrengungen im Sanierungsbereich:** Im Frühjahr 2003 soll dazu ein Wettbewerb für Gebäudesanierungen, die nahe an den *Passivhaus*-Standard kommen, ausgeschrieben werden.
- **Ausdehnung der gesamtheitlichen Optimierung vom Einzelgebäude auf Quartiere:** Ende 2002 wurden in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Raumentwicklung verschiedene Quartierentwicklungsprojekte gestartet und ein erstes Mal an der Swissbau 2003 vorgestellt.
- **Bessere Integration des Warmwasserbereichs:** Vorarbeiten für eine Berechnungsmethode Warmwasser wurden in Angriff genommen. Damit soll eine Grundlage geschaffen werden, um bei der Berechnung des Jahresenergiebedarfs auch den immer wichtiger werdenden Anteil des Warmwassers korrekt

berücksichtigen zu können. Bis heute wurden dazu immer nur die Standardwerte für die Gebäudekategorie eingesetzt.

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

Eine nahezu vollständige Übersicht über aktuelle Forschungsarbeiten konnte am **Status-Seminar Energie- und Umweltforschung im Hochbau** [52], welches am 12./13. September 2002 zum 12. Mal an der ETH Zürich durchgeführt wurde, vermittelt werden. Das Seminar wurde erstmals zusammen mit dem **BFE-Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen EWG** [53] durchgeführt, wodurch auch Forschungsarbeiten zu den sozio-ökonomischen Aspekten der Energienutzung präsentiert werden konnten. Die Beiträge zur Energie- und Umweltforschung im Hochbau sind im Internet unter www.empa-ren.ch/ren/Aktualitaet.htm abrufbar, der Tagungsband der sozio-ökonomischen Energieforschung kann bestellt werden [53].

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** (JB)
- [2] R. Frischknecht, (frischknecht@esu-services.ch), ESU, Uster: **Ökoinventare für Solar- und Heizsysteme** (JB)
- [3] M. Vogel, (Martin.Vogel@bve.be.ch), Hochbauamt Kt. Bern, Bern: **eco-devis: Ökologische Leistungsbeschreibungen** (JB)
- [4] A. Lalive, (alalive@bhz.ch), Basler&Hofmann, Zürich: **Ökologische Optimierung von Solargebäuden über deren Lebenszyklus** (Beitrag IEA/SHC Task 28) (JB)
- [5] J.-L. Hersener, (hersener@pop.agri.ch), Ingenieurbüro, Wiesendangen: **Einblasdämmstoff aus Faserhanf und Altpapier** (SB)
- [6] 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** (JB)
- [7] T. Andris, (tom.andris@renggli-haus.ch), Renggli AG, Schötz: **Marktanalyse Passivhaus Schweiz** (Beitrag IEA/SHC Task 28) (JB)
- [8] A. Binz, (a.binz@fhbb.ch), FHBB, Muttenz: **a) Minergie[®] und Passivhaus: Zwei Gebäudestandards im Vergleich** (SB) • **b) Vakuum-Dämmung im Baubereich – Systeme und Applikationen** (Beitrag IEA BCS Annex 39) (JB)

- [9] A. Baumgartner, (andreas.baumgartner@amstein-walthert.ch), Amstein + Walthert AG, Zürich: **Definition von Zusatzanforderungen zu den MINERGIE®-Standards** (JB)
- [10] H. Huber, (hjhuber@hta.fhz.ch) HTA Luzern, Horw: **Einfache Lüftungsanlagen - Entwicklung von Berechnungstool für einfache Lüftungsanlagen** (JB)
- [11] L. Nissille und Th. Huber, (lukas.nissille@minergie.ch) (thomas.huber@minergie.ch) MINERGIE® Agentur Bau, Bern: **Standardlösungen - Entwicklung von Standardlösungen für den MINERGIE®-Standard** (JB)
- [12] Y. Kaiser, (sonnenarchitektur@energienetz.ch), Kaiser & Partner, Winterthur: **Solargebäude – Strategien und Erfahrungen des energieoptimierten Bauens** (JB)
- [13] Ch. Filleux, (chfilleux@BHZ.ch), Basler + Hofmann, Zürich: **Planungsrichtlinie für solare Luft-Heizsysteme** (JB)
- [14] A. Gütermann, (amena.ag@energienetz.ch), amena ag, Winterthur: **Messprojekt «Mehrfamilien-Passivhaus mit solarem Luftsystem»** (SB)
- [15] S. Kropf, (kropf@hbt.arch.ethz.ch), ETH, Zürich: **Integration von kombinierten PV- und thermischen Kollektoren in Gebäudesystemen** (JB)
- [16] P. Jaboyedoff, (sorane@worldcom.ch), Sorane, Lausanne: **IEA/SHC Task 23: Optimisation of solar energy use in large buildings** (SB)
- [17] 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)
- [18] Th. Kersten, (thorsten.kersten@infomind.ch), infomind gmbh, Zürich: **Wärmebrücken-Atlas WBB 2000** (SB)
- [19] M. Erb, (markus.erb@eicher-pauli.ch), Eicher+Pauli AG, Liestal: **a) High Performance Thermal Insulation in Buildings (IEA BCS Annex 39 – Vorphase)** (JB) • **b) Feldanalyse von kondensierenden Gas- und Ölfeuerungsanlagen** (JB)
- [20] 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)
- [21] C.U. Brunner, (Conrad.U.Brunner@cub.ch), Büro CUB, Zürich: **Richtlinie für Gebäude mit hohem Glasanteil** (SB)
- [22] Ch. Tanner, (christoph.tanner@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Messung und Beurteilung der Luftdichtigkeit von Niedrigenergiehäusern** (JB)
- [23] W. Seidinger, (seidinger@lemonconsult.ch), Lemon Consult, Zürich: **Entwicklung eines Kälte-Tools zur Methodik SIA 380/4 «Elektrische Energie im Hochbau»** (SB)
- [24] G. Zweifel, (gzweifel@hta.fhz.ch), HTA, Luzern/Horw: **IEA/SHC Task 22: Validierung von Simulationsprogrammen** (JB)
- [25] Hp. Eicher, (hanspeter.eicher@eicher-pauli.ch), Eicher+Pauli AG, Liestal: **Bestellerkompetenz im Bereich Gebäudetechnik** (JB)
- [26] J.-M. Chuard, (chuard@enerconom.ch), Enerconom, Bern: **Commissioning of Building HVAC Systems for Improved Energy Performance** (IEA BCS Annex 40 – Vorphase) (JB)
- [27] R. Furter, (rfurter@hta.fhz.ch), HTA, Luzern/Horw: **Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte für Komfortlüftung** (JB)
- [28] V. Dorer, (viktor.dorer@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **a) Optimierte Luftheizsysteme für Passivhäuser** (JB), • **b) Energieeffiziente und bedarfsgerechte Abluftsysteme mit Abwärmenutzung, (ENABL)** (SB)

Liste der P+D-Projekte

- [29] J. Bienz, (juerg.bienz@chiquet-sopra.ch), Chiquet-Energietechnik, Ormalingen: **Messprojekt Grasswil** (SB)
- [30] R. Naef, (naef@igjzh.com), Naef Energietechnik, Zürich: **a) Öko-Siedlung Melchrüti (Wohnpark Balance Wallisellen)** (JB) • **b) Wohnen in Sunny Woods** (JB)

- [31] Th. Nordmann, (clavadetscher@tnc.ch), Erlenbach: **Messprojekt Niedrigenergiehaus Erlenbach** (JB)
- [32] Werner Vetsch, (vetsch-bauplanung@bluewin.ch), Grabs: **Synergiepark für erneuerbare Energien** (SB)
- [33] W. Setz, (setzw@bluewin.ch), Architekt, Rapperswil: **1. Schweizerischer Wohn- und Gewerbebau im Passivhaus-Standard** (JB)
- [34] D. Schwarz, (schwarz@schwarz-architektur.ch), Architekt, Domat/Ems: **TWD-Fassadenelement mit integriertem Latentwärmespeicher und Sonnenschutz** (SB)
- [35] B. Bossard, (barbos@tic.ch), Barbos Bauteam, Stans: **Passiv-Acht-Familienhaus** (JB)
- [36] K. Viridén, (viriden@viriden-partner.ch), Viridén+Partner, Zürich: **a) Passivhaus im Umbau** (JB) **b) Umbau Nietengasse 20 - mit bestehender Backsteinfassade, c) Passivhaus-Umbau Zwinglistrasse 9+15**
- [37] Ch. Breu, (breu_christoph@bluewin.ch), Architekt und Ingenieur, Rickenbach: **Passiv-Mehrfamilienhaus Stämpfli Unterägeri** (JB)
- [38] M. Stüssi, (mstuessi@dplanet.ch) Barga: **Neubau Zweifamilienhaus „Im Tal“ 8233 Barga SH, Heizung - Warmwasser - Wäschetrocknung mit einer Duplex-Wärmepumpe**
- [39] D. Pahud, (daniel.pahud@dct.supsi.ch), LEEE-SUPSI, Trevano: **Low Energy Housing in Ticino (Beitrag IEA SHC Task 28)** (JB)
- [40] P. Stähli, (Peter.Staehli@swisseconomic.ch), IEM AG, Gwatt-Thun: **Wellness Wärmerückgewinnungsanlage Brauchwarmwasser, Parkhotel Adelboden** (JB)
- [41] A. Gütermann, (amena.ag@energienetz.ch), amena ag, Winterthur: **a) Integration eines solaren Luftsystems und PV bei einer Gebäudesanierung, Braunwald** (SB Feb.2003) **b) Integration einer konvektiven Fassade in ein Heimatschutzobjekt, Herisau** (SB April 2003) **c) Minergie®-P-Gebäude mit Gratec und Luftkollektorsystem**
- [42] R. Kissling (rolf.kissling@haring.ch) Häring Fenster und Fassaden AG HFF, Niederdorf BL: **Wohnüberbauung NiedrigstEnergieHäuser Stäfa**, (SB)
- [43] Kurt Hildebrand (khildebrand@hta.fhz.ch), HTA Luzern, Horw: **New Spirit** (SB)
- [44] E. Hächler, (ernst.haechler@suisselectra.ch), Suisselectra, Basel: **Phönix light – Heizen und Kühlen mit PCM** (SB)
- [45] C. Tenore (home@pro-tec.ch), Protec SA, Losone: **Offene Eisbahn mit Kälteträger CO₂, (Risagnamente Pista di ghiaccio aperta «Siberia» Ascona)** (SB)
- [46] F. Gachnang, (gachnang@eta-energietechnik.ch), eta Energietechnik, Winterthur: **Deckenstrahlung in Eishallen und überdeckten Ausseneisfeldern** (JB)
- [47] M. Renggli, (max.renggli@renggli-haus.ch), Renggli AG, Sursee: **Wohn- und Geschäftshaus Renggli, Sursee**,
- [48] Reto Miloni, (miloni@swissonline.ch) Lichtplanung Miloni, Mülligen: **Passivhaus mit Atelier, Pratteln**
- [49] Peter Schibli, (synergiepark@bluewin.ch) Heizplan AG, Gams: **Datenerfassung Synergiepark für erneuerbare Energien**

Referenzen

- [50] M. Zimmermann (mark.zimmermann@empa.ch): **Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden 2000-2003, EMPA ZEN, November 2001**
- [51] C.U. Brunner et al., (Conrad.U.Brunner@cub.ch): **SIA Merkblatt 2021: Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz, SIA Zürich, Juli 2002**
- [52] C.U. Brunner et al., (Conrad.U.Brunner@cub.ch): **SIA Dokumentation D 176: Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz, SIA Zürich, 2002**
- [53] H. Bertschinger und M. Zimmermann, (mark.zimmermann@empa.ch): **12. Schweizerisches Status-Seminar «Energie und Umweltforschung im Bauwesen 2002, ETH Zürich, 12./13. Sept. 2002**

VERKEHR / AKKUMULATOREN

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2002

Martin Pulfer

martin.pulfer@bfe.admin.ch



Tohyco - Rider beim Roll Out

Der Tohyco Rider verfügt als Hauptenergiespeicher einzig über Hochleistungskondensatoren. Diese speichern die Energie für eine Reichweite von 3 bis 5 km und werden an der Endstation einer Buslinie innert Minuten induktiv (berührunglos) wieder aufgeladen.

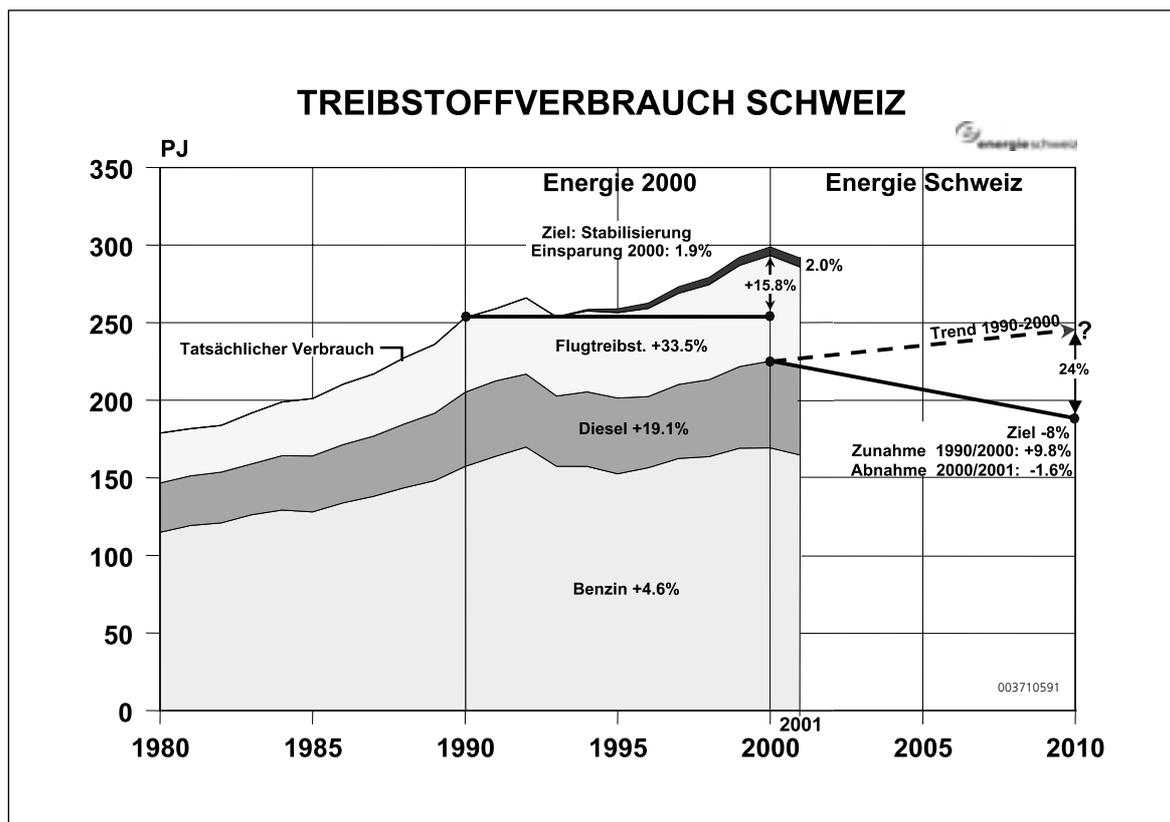
Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

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

Entsprechend dem **Kyoto-Protokoll** und dem CO₂-Gesetz ist die Schweiz verpflichtet, bis im Jahr 2010 die CO₂-Emissionen um 10 % zu senken. Betroffen ist auch der Verkehr. Figur 1 macht ersichtlich, wie ambitionös das gesteckte Ziel ist: Vor allem mit freiwilligen Massnahmen sollen der Energieverbrauch und die Emissionen gegenüber dem Stand 1990 um 8% reduziert werden. Leider läuft der Trend in die Gegenrichtung.

Der Treibstoffverbrauch kann durch ein **adäquates Mobilitätsverhalten** drastisch gesenkt werden. Sehr viele Kurzstreckenfahrten können z.B. energie- und zeitsparend durch ein einspuriges Verkehrsmittel (Velo, E-Bike, Roller, etc.) ersetzt werden. Allein mit dem Fahrstil *EcoDrive* kann 10 –15 % Treibstoff eingespart werden. Durch den Kauf eines effizienten Personenwagens lassen sich, gegenüber den ineffizienten, bei gleichem Nutzvolumen, gut 30 % Treibstoff sparen. Der Durchschnittsverbrauch der Schweizer Fahrzeugneuflotte lag 2001 bei 8,29 Liter pro 100 km. Dieser mittlere Verbrauch wird heute bereits von einer Vielzahl auch grosser Fahrzeuge deutlich unterschritten.

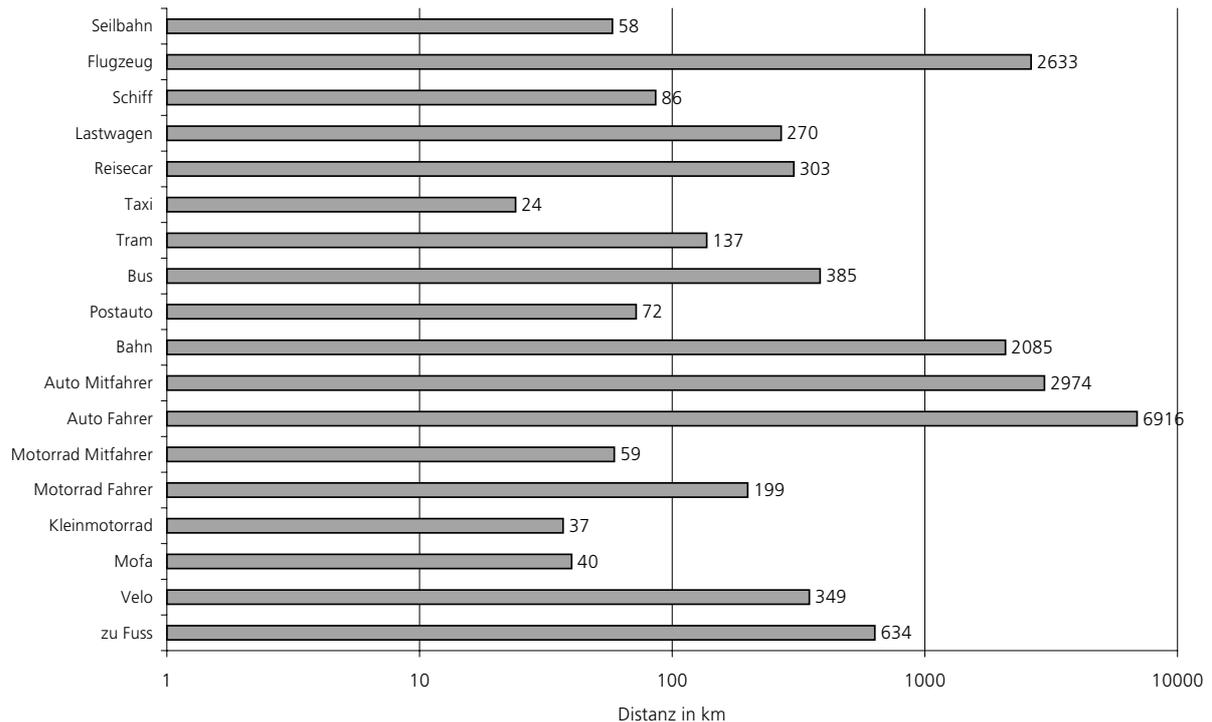
Das Forschungsprogramm *Verkehr* untersucht Ansätze und Massnahmen zur Absenkung des



Figur 1: Treibstoffverbrauch von 1980 bis 2001 und Zielwerte für 2010

Entsprechend der Statistik *Das Mobilitätsverhalten der Schweizer 2000 - Mikrozensus* legt ein Schweizer über 6 Jahren im Schnitt pro Jahr eine Distanz von 17'400 km zurück. Diese Distanz bewältigt er hauptsächlich mit dem Auto (Figur 2).

Energieverbrauchs im Verkehr, insbesondere beim Hauptverbraucher, dem motorisierten Individualverkehr. Ziele und Themen, die bei der Ausrichtung des Programms berücksichtigt werden, sind Reduktion der Umweltbelastung, Industriestand-



Figur 2: durchschnittliche Distanzen, welche von den Schweizer(inne)n mit verschiedenen Verkehrsmitteln jährlich zurückgelegt werden

ort Schweiz, Chancen für Bildung und Wissenschaft. Eine Verringerung des Energieverbrauchs beim Individualverkehr kann dabei vor allem mit folgenden Ansätzen erschlossen werden:

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

Das Programm *Akkumulatoren* erforscht die Möglichkeiten zur verbesserten Speicherung elektrochemischer und elektrostatischer Energie. Die Schwerpunkte liegen insbesondere bei:

- Bleiakkumulatoren: bewährte, aber immer noch verbesserungsfähige Batterien

- Lithiumionen- und Polymerbatterien: Systeme mit höchster Energiedichte
- Zebra-Batterie: System mit sehr hoher Energiedichte, nahe der Marktreife
- Super-Cap: Hochleistungskondensatoren mit einer sehr hohen Leistungsdichte, einer tieferen Energiedichte und einer sehr langen Lebensdauer

In dem von der CORE genehmigten Konzept für die Forschungsprogramme *Verkehr* und *Akkumulatoren* [22] wurden die Schwerpunkte entsprechend gelegt und die Fragen an die Forschung formuliert.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

VERKEHR

Grundlagen

Im Auftrag des Bundesamtes für Energie wurde am Paul Scherrer Institut (PSI) eine **Studie zu den Treibhausgasemissionen der zukünftigen (bis 2050) europäischen Stromerzeugung**

[1] ausgearbeitet. Ausgangspunkt sind Prognosen der *Eurelectric*, eines Verbandes europäischer Stromerzeuger. Für die Zeit nach 2020 wurde eine unveränderte Entwicklung angenommen (Standardszenario). Für Sensitivitätsanalysen werden ein kohlenstoffintensives und ein vergleichsweise kohlenstoffarmes Szenario für die Jahre 2030 und 2050 betrachtet, die vom *International Institute*

for Applied Systems Analyses (IIASA) erstellt wurden. Ergänzend dazu werden die Entwicklung der Kraftwerkstechnologie sowie der Brennstoffketten abgeschätzt. Die Ergebnisse des Standardszenarios zeigen eine deutliche Reduktion der spezifischen Treibhausgas-Emissionen: Im Jahr 2000 betragen die durchschnittlichen Emissionen der Erzeugung in der UCTE: 522 g CO₂-eq. / kWh, im Jahr 2050 im Standardszenario noch 331 g CO₂-eq. / kWh (jeweils bezogen auf den Bezug ab Mittelspannungs-Netz). In Sensitivitätsanalysen wurde gezeigt, dass dabei die substantiellen Unsicherheiten bei den neuen erneuerbaren Energiequellen nur einen geringen Einfluss auf das Endergebnis haben. Auf der anderen Seite zeigen die Sensitivitätsanalysen mit den Szenarien des IIASA deutliche Abweichungen zum Standardszenario. Hier liegen die Emissionen im Jahr 2050 um 39% über (kohlenstoff-reich) bzw. 32% unter (kohlenstoff-arm) dem Standardszenario.

Leichtbau

Mit dem Projekt **MODULTEC** [2] zeigt die Firma *Horlacher AG* in Möhlin, wie Fahrzeuge bei gleicher oder besserer Sicherheit erheblich leichter und damit energiesparender gebaut werden können. Dank der modularen Bauweise und der Verwendung von Faserverbundstoffen, auch für statisch belastete Teile, soll eine Gewichtsreduktion von 30% gegenüber einem vergleichbaren Fahrzeug in herkömmlicher Bauweise erreicht werden. Der modulare Fahrzeugaufbau ist auch auf die Entwicklung in der Automobilindustrie ausgerichtet, wonach Autos zunehmend nach dem Baukastensystem gefertigt werden. Längerfristig dürften die Autohersteller nur noch wenige wichtige Elemente selber fertigen und die restlichen Elemente als Module von Zulieferern beziehen. Die bedeutende Schweizer Zulieferindustrie (ca. 7 Mia Fr. Jahresumsatz) erkennt gerade in dieser Entwicklung auch eine Chance. Im Projekt **MODULTEC** gewährt die enge Zusammenarbeit mit der Industrie und deren weiteren Zulieferern eine optimale und rasche Umsetzung der Ergebnisse. Die Ziele sind die Entwicklung und die Optimierung verschiedener Karosseriemodule in Leichtbauweise. Insbesondere die Bodengruppe soll sich für die Integration von unterschiedlichen Antriebssystemen und ihren Energie- respektive Treibstoffspeichern eignen.

Bei **MODULTEC I**, das von 1995 bis 1998 dauerte, lag das Schwergewicht im Design und der Entwicklung einer selbsttragenden, möglichst leichten Karosserie aus Kompositen, die in Modulen aufgebaut ist und welche die geltenden Sicherheitsstandards erfüllt. Neben der Suche

nach der optimalen Segmentierung standen Tests mit verschiedenen Kunststoffen und Verfahren im Vordergrund. Ausser der Stabilität und der Fertigungszeit spielte die möglichst vollständige Recyclierbarkeit der verwendeten Materialien eine wesentliche Rolle. Ferner sind erste Klebstoffe zur späteren Verklebung der einzelnen Module getestet worden. Zur Demonstration ist ein Modell einer vollständigen Karosserie aus Faserverbundstoff für ein 2-plätziges Kompaktfahrzeug in Originalgrösse entwickelt und gebaut worden. Dieses lässt sich von zwei Personen in weniger als drei Minuten zusammenstecken (ohne Verleimung, Vernietung oder Verschraubung).

MODULTEC II (1999 – 2002) stellte einen ersten Teilschritt zur industriellen Umsetzung dieser Ergebnisse dar. Hierfür wurden bei einem Serienfahrzeug die Bodengruppe und das komplette Dach durch Module aus Kunststoff ersetzt. Für dieses Projekt konnte die *Rieter Automotive AG*, der grösste Schweizer Automobilzulieferer, als Partner gewonnen werden. Die bisherigen Arbeiten bestätigen die zentrale Rolle der Segmentierung. Sowohl das Boden- wie auch das Dachmodul sind auf der Basis der vom Fahrzeughersteller gelieferten Daten gefertigt worden. Beim Bodenmodul zeigte sich, dass die zum Grundformensatz hinzugefügten Vertiefungen für nachträglich einzubauende Komponenten eine Verbesserung der Steifigkeit bewirkten. Dies erlaubte es, grosse Flächen in der gleich dünnen Materialstärke herzustellen, wie kleineren Flächen, was eine entsprechende Gewichtsreduktion ermöglichte. Dank einer weitergehenden Auswertung der Formdaten und der Vereinfachung derselben Formen konnte beim Dachmodul ein wesentlicher Arbeitsschritt eingespart werden. Da die Daten weitgehend an die Konstruktionsanforderungen bei Kunststoff angepasst wurden, musste kein Urmodell gefertigt werden. Die bearbeiteten CAD-Daten konnten direkt zum Fräsen der Negativformen verwendet werden. Mit den Gewichtseinsparungen, die das Boden- und das Dachmodul erlauben, lässt sich das Leergewicht des verwendeten Fahrzeugmodells von 1250 kg auf 1100 kg senken. Dadurch kann auch der Treibstoffverbrauch um ca. 10 % abgesenkt werden.

Da mit dem Boden und dem Dachmodul die beiden komplexesten Teile zuerst realisiert worden sind, darf davon ausgegangen werden, dass sich die ganze Fahrgastzelle in modularer Leichtbauweise aus faserverstärkten Kunststoffen herstellen und sich das gesamte Fahrzeuggewicht entsprechend um etwa 30% senken lässt (Figur 3). In einem Folgeprojekt sollen **weitere Module in der gleichen Technik** hergestellt werden und

das Bodenmodul zur serienreifen Bodengruppe weiterentwickelt werden. Im Hinblick auf die Verwendung des Bodenmoduls für unterschiedliche Antriebs-Systeme soll der Wasserstoffspeicher eines mit Brennstoffzellen ausgerüstetes Autos in den Boden integriert werden. Ferner wird die Eignung der Kunststoffkarosserie als modularer Kapillarspeicher für Wasserstoff und weitere gasförmige Treibstoffe getestet.



Figur 3: Explosionsmodell eines modularen Leichtbaufahrzeuges

Antriebssysteme

Das **PALOS II** (PArT Load Optimized propulsion System) Projekt der ETH Zürich [3] befasst sich mit der Erhöhung des Teillastwirkungsgrades von Antriebssystemen. Das Projekt ist in zwei Teilprojekte gegliedert:

Aufladung: Eine Aufladung des Verbrennungsmotors ermöglicht es, einen hubraumreduzierten Motor zu verwenden. Dies ergibt bessere Wirkungsgrade in der Teillast, jedoch eine schlechtere Dynamik (Fahrbarkeit) des Fahrzeugs. Für die Aufladung kommen unterschiedliche Aggregate in Frage. Hier 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.

Ausgehend von einem detaillierten thermodynamischen Modell des Druckwellenladers wurde eine erste Strategie für die Betätigung der unterschiedlichen Stellorgane des Druckwellenladers mit Hilfe von Optimierungsverfahren hergeleitet.

Die Lösung zeigt, dass gegenüber bisher verwendeten Ansätzen deutliche Verbesserungen bezüglich einer ungewollten Abgasrückführung und der Fahrbarkeit möglich sind. Am Prüfstand wurde eine gründliche Vermessung des mit Abgasturbolader ausgestatteten Versuchsmotors durchgeführt. Der Umbau auf Druckwellenlader sollte demnächst in Angriff genommen werden.

Nebenaggregate: 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. Ein optimales Management kann den Verbrauch senken und die Fahrsicherheit und den Insassenkomfort verbessern. Basierend auf einer geeigneten mathematischen Beschreibung des Systems und einigen vereinfachenden Annahmen konnten optimale Regelstrategien für verschiedene Zuheizervarianten entwickelt werden.

Basierend auf Modellen aller beteiligter Komponenten und einem dynamischen Schätzer für die Kühlleistung wurde eine kraftstoffoptimale Ansteuerung für Wasserpumpe und Ventilator hergeleitet.

Im **Bresa-Projekt** [4] des PSI ist in einem Volkswagen **BORA** ein Antriebsstrang realisiert worden, der ein Brennstoffzellensystem, bestehend aus 6 Stapeln mit je 8 kW elektrischer Leistung, einen elektrischen Zwischenspeicher aus 282 Supercap-Zellen (Kondensatoren mit grosser Kapazität), die gesamthaft 360 Wh Elektrizität speichern können, einen DCDC-Konverter und einen 75 kW-Elektromotor umfasst. Der Antriebsstrang wird über ein Energiemanagement geregelt, das die geforderte Leistung optimal auf die Brennstoffzelle und den Zwischenspeicher verteilt. Das Brennstoffzellensystem erreicht über einen weiten Bereich des Betriebs einen Wirkungsgrad von über 40%. Als **HY.POWER** fuhr dieses als Technologieplattform aufgebaute Fahrzeug am 16. Januar 2002 über den Simplonpass. Damit konnte nachgewiesen werden, dass dieses Konzept die Reife für öffentliche Strassen erreicht hat und harte Testbedingungen bestehen kann. Die Kernelemente des **Bresa**-Konzepts sind die Anwendung einer neuen Technik bei der Herstellung der Bipolarplatten für die Brennstoffzellen, dem Systemaufbau des Brennstoffzellensystems und der Weiterentwicklung der Energiedichte der Supercaps. Die Kombination von Brennstoffzelle und Supercap zusammen mit einem äusserst effizienten DCDC-Wandler führte zu einem neuartigen Antriebskonzept. Der Verbrauch im europäischen Testzyklus von 5-6 Litern Benzin-

äquivalent ist für ein Fahrzeug mit einem Gewicht von ca. 2000 kg bemerkenswert tief. Natürlich gilt es, bei der Umsetzung den Systemwirkungsgrad weiter zu erhöhen und insbesondere das Fahrzeuggewicht zu senken. Das Fahrzeug diente auch der Kommunizierung der neuen Technik an die breite Öffentlichkeit. Neben der Passfahrt als Medienereignis (s. Fig. 4) wurde das Fahrzeug am Genfer Autosalon 2002 und am Earth-Summit in Johannesburg (September 2002) ausgestellt.



Figur 4: Der Bora-Bresa hat den Aufstieg zum Simplonpass geschafft

AKKUMULATOREN

Die Firma *MES DEA* aus Stabio konnte ihr Projekt **Erhöhung der spezifischen Energie der ZEBRA Batterie** [5] im Berichtsjahr erfolgreich abschliessen. Hierbei sind folgende Resultate (s. Fig.5) erzielt worden:

1. Das Granulat (aktives Material der ZEBRA Zelle) wurde in seiner Zusammensetzung so modifiziert, dass die **Kapazität** von 32Ah auf 38Ah erhöht werden konnte. Allerdings haben die Dauerversuche gezeigt, dass die mit diesem Granulat hergestellten Zellen nicht mehr schnellladefähig sind. Hier sind weitere Arbeiten erforderlich während derer die Produktion beider Typen Granulat erfolgt. Als weiteres sehr positives Ergebnis konnte beim neuen Granulat auf die Beimischung von

Schwefel verzichtet werden, wodurch die Zellen auch bei einem Kurzschluss im 100% geladenen Zustand und adiabatischer Aufheizung auf 800°C geschlossen blieben. Dies wurde in einem entsprechenden Test mit dem Batterietyp Z22 nachgewiesen.

2. Es wurden Zellen mit **reduzierten Materialwandstärken** gebaut und qualifiziert. Dadurch konnte das Gewicht um 33 g je Zelle reduziert werden, was etwa 7 kg je Batterie bedeutet. Allerdings muss noch geprüft werden, ob das *shim*-Material nicht überproportional teurer ist.

3. Alle Bauteile der Batterie wurden auf **Gewichtseinsparung** überarbeitet, so dass sich einschliesslich der Gewichtsreduzierung der Zellen ein Mindergewicht von 15 kg je Batterie Typ Z5 erreichen liess. Damit wurde das Projektziel einer Erhöhung der spezifischen Energie um 20% sogar um 5% übertroffen (195 kg reduziert auf 180 kg).

4. Sowohl die Änderungen an der Zelle als auch die Konstruktionsänderungen an der Batterie müssen vor Produktionsbeginn noch fertig qualifiziert werden. Diese Arbeiten haben begonnen und werden wegen der Langzeitversuche noch einige Zeit in Anspruch nehmen. Das Projekt ist dennoch schon jetzt abgeschlossen worden, weil die Dauer der Langzeitversuche nicht vorhersehbar ist.

	Vorher	Nachher
Spezifische Energie	94 Wh/kg	118 Wh/kg
Nennenergie	17,8 kWh	21,2 kWh
Gewicht	195 kg	184 kg
Max Leistung	32 kW	32 kW
Spezifisch Leistung	169 Wh/kg	178 Wh/kg

Figur 5: Die Verbesserungen an der Zebrabatterie auf einen Blick (Quelle: MES-DEA)

Nationale Zusammenarbeit

Die Vernetzung ergibt sich im Programm *Verkehr / Akkumulatoren* insbesondere durch die Eigeninitiative der Projektnehmer. Erinnerung sei in diesem Zusammenhang zum Beispiel 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. Durch ein langfristiges Engagement des BFE wurde die Bildung von Kompetenzzentren und Netzwerken gefördert und gestärkt. Die Zusammenarbeit der ETH Institute inkl. PSI, EMPA, der Fachhochschulen und der Industrie funktioniert gut.

Internationale Zusammenarbeit

Das EU-Forschungsprojekt **CLEANER DRIVE** [21a] hat zum Ziel, das Know how, die Erfahrungen und die laufenden Aktivitäten hinsichtlich Markteinführung von umweltschonenden Fahrzeugen in europäischen Ländern zu koordinieren. Dabei wird eine konsistente Methodologie für eine Umweltbewertung von Fahrzeugen entwickelt und im Sinne eines Pilotprojekts auf einer Website getestet. Als weiteres Ziel soll eine Entscheidungshilfe für die Fahrzeugbeschaffung erarbeitet werden, welche dazu beiträgt, den Umweltkriterien beim Fahrzeugkauf vermehrt Beachtung zu schenken (Hauptzielgruppe: Flottenbetreiber). Schliesslich sollen die strukturellen Hindernisse für die Einführung von gasförmigen Treibstoffen untersucht werden, vor allem im Hinblick auf Brennstoffzellenfahrzeuge.

Im Berichtsjahr wurden weltweit ca. 40 Bewertungsmethoden untersucht und analysiert. Darauf basierend wurden einige methodische Grundsatzfragen formuliert und in einem Workshop mit rund 20 Experten aus verschiedenen Bereichen diskutiert. Das Grundgerüst der Methode wurde in einem Zwischenbericht beschrieben und dient als Grundlage für die 1. Version der künftigen Website. Als kritischer Punkt hat sich die **Verfügbarkeit der Daten** herausgestellt. Die für die Bewertung erforderlichen Input-Daten sind nicht in allen Ländern vorhanden oder zumindest nicht in einheitlicher Form. Eine holländische Firma (RDW) führt im Auftrag der holländischen Regierung eine Datenbank mit allen Fahrzeugen, welche in einem EU-Land auf dem Markt sind. *Novem* (NL) klärt zur Zeit ab, ob diese Daten für **CLEANER DRIVE** verfügbar sind. In diesem Fall müssten für die Schweiz nur einige länderspezifische Daten beschafft werden (z.B. Kosten). Ansonsten wird auf die ASTRA-Datenbank *targa data* zurückgegriffen. Auf Bundesebene begleiten das BFE, das BUWAL und das ASTRA das Projekt. Das BBW unterstützt die Koordination mit der EU. Um einerseits die Erfahrungen der Marktakteure gebührend berücksichtigen zu können, aber auch im Hinblick auf die Umsetzung der Ergebnisse wurde Kontakt mit dem Schweizerischen Fahrzeug-Flottenbesitzer-Verband (sffv) aufgenommen. Der *Schweizerische Gasverband* und der *Schweizerische Verband für elektrische und effiziente Strassenfahrzeuge*, e'mobile, welche die zur Zeit aktuellen Treibstoffalternativen vertreten, sind direkt im Projekt involviert. Am Projekt beteiligen sich neben der Schweiz Grossbritannien (Koordinator), Frankreich, Italien, Belgien, Öster-

reich, Holland, Finnland und Schweden. Die EU-Kommission begleitet das Projekt direkt.

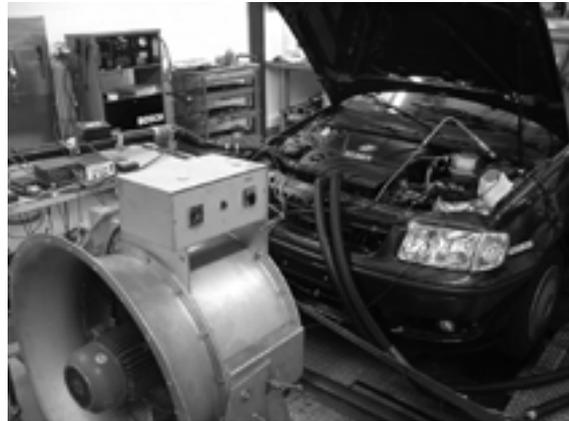
Die Entwicklung der **Bewertungsmethode** traf auf die erwarteten Schwierigkeiten, insbesondere beim Dilemma zwischen wissenschaftlicher Vollständigkeit und Datenverfügbarkeit respektive bei der Übersichtlichkeit. Beispielhaft sei hier das Kriterium Lärm erwähnt: Es gehört unbestrittenmassen zu den grossen verkehrsbedingten Umweltproblemen. Die normierten Messwerte stimmen aber so schlecht mit den auf der Strasse festgestellten überein, dass auf dieses Kriterium verzichtet wurde. Immerhin soll an prominenter Stelle der Website auf das Thema hingewiesen werden. Ende Mai 2003 wird die Testversion der Website auf die Schweiz übertragen. Anschliessend wird sie ausgewählten Zielgruppen zum Test unterbreitet. Der Feedback dient als Grundlage für die zweite Version der Website.

ELEDRIIVE [21b] ist ein so genanntes 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 Teilnehmer gehören Automobilhersteller inkl. Komponenten- und Infrastrukturhersteller, Motoren- und Treibstoffindustrie, Organisationen, welche sich mit innovativen Transportsystemen befassen, Behördenvertreter sowie Marketingfachleute und Anwender. e-mobile vertritt als Beobachter die Interessen der Schweiz. Der 3. Workshop vom September 2002, zur Halbzeit des Projektes, war der Übersicht über den Stand in den einzelnen Workpackages gewidmet. Einige gute Fortschritte sind zu verzeichnen. Ein weiterer Schwerpunkt des Workshops war eine Beteiligung am 6. Rahmenprogramm, eventuell in der Form eines Networks of excellence. Im Juli 2004 ist ein durch e'mobile organisierter **ELEDRIIVE-Workshop** im Rahmen des *Fuel Cell Forums* in Luzern geplant. Die im ersten Projektjahr festgestellte Zurückhaltung der Industrie-Vertreter in der Offenlegung von Informationen konnte nicht überwunden werden. W. Borthwick, der EU-Delegierte in **ELEDRIIVE**, rief zu einer aktiven Mitarbeit vor allem der Industriepartner auf.

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* entwickeln das **Clean Engine Vehicle** [6]. Ziel des Projektes ist 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 dient ein VW Polo mit dem 1.0 Liter-Benzinsaugmotor (s. Fig. 6). Das Projekt beinhaltet im Wesentlichen den Umbau auf monovalenten Erdgasbetrieb, die Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses, die Abgasturboaufladung und die Applikation der Motorsteuerung. Um den Versuchsaufwand auf dem Motoren- und dem Rollenprüfstand reduzieren zu können, wurde mit Hilfe der Computersimulationen die optimale Strategie evaluiert. Durch die gasförmige Erdgaseinblasung wird der Liefergrad des Motors vermindert, was bei Teillast zu einer willkommenen Entdrosselung, bei Vollast aber zu einer Leistungs- bzw. Drehmomenteinbusse führt. Diese Einbusse wurde durch eine Verdichtungserhöhung und Turboaufladung kompensiert und dabei die Leistung auf 44 kW und das Drehmoment auf 116 Nm angehoben. Damit erreicht der aufgeladene 1.0 Liter-Erdgasmotor die Leistungs- und Drehmomentdaten des motoren-technisch vergleichbaren 1.4 Liter-Benzinmotors im VW Polo, der deshalb als CO₂-Vergleichsbasis dienen wird. Die Roh-Abgasemissionen eines Erdgasmotors sind verglichen mit denjenigen eines Benzinmotors wesentlich niedriger. Um die kalifornischen und die europäischen Grenzwerte zu erreichen, muss trotzdem ein Katalysatoren mit hohen Umwandlungsraten eingesetzt werden. Das grösste Problem stellt dabei die Methanumwandlung dar, die aufgrund der stabilen Molekülstruktur eine höhere Temperatur verlangt, als dies bei Kohlenwasserstoff-Gemischen von Benzinmotoren der Fall ist. In Zusammenarbeit mit dem Katalysatorträgerhersteller *Corning GmbH* und dem Katalysatorbeschichter *Engelhard Technologies GmbH* wurde der bestehende Metallträger-Vorkatalysator durch einen grösseren und höherzelligen Keramikträgerkatalysator mit einer für die Methanumwandlung geeigneten Beschichtung



Figur 6: Das Clean Engine Vehicle der EMPA auf dem Prüfstand



Figur 7: Der Rinspeed Presto weckt Emotionen und baut Vorurteile gegenüber Erdgas als Treibstoff ab.

ersetzt. Damit konnten sehr niedrige Emissionswerte erreicht werden.

Die Arbeitsgemeinschaft *Gasverbund Mittelland* (SVGW) und *Rinspeed AG* entwickelte im Berichtsjahr in Zusammenarbeit mit weiteren Partnern das **Swiss Dual-Fuel – Projekt** [7]. Basis war ein Mercedes-Benz A-Klasse 170 CDI (als Realitätsfahrzeug) mit Zündstrahlantrieb und dem attraktiven und medienwirksamen *Rinspeed Presto®* (s. Fig. 7) mit Erdgasmotor als Vision. Am Auto-Salon in Genf konnten die Fahrzeuge als Neuheiten einem riesigen Publikum präsentiert werden. Die aussergewöhnliche, positive und motivierende Kommunikationsstrategie für Umweltgedenken und entsprechendem Handeln im Zusammenspiel mit einem visionären Konzeptfahrzeug als kommunikatives und mediales Zugpferd ist weltweit

auf ein sehr grosses und positives Echo gestossen. Damit zeigt sich eindrücklich, dass aussergewöhnliche Kommunikationsstrategien, -massnahmen und -wege Erfolgversprechend beschriftet und dementsprechend überzeugende Resultate erreicht werden können.

Technologische und adaptive Fortschritte in der Umsetzung des *Swiss Dual-Fuel*-Konzeptes auf dem Dieselmotor ermöglichten, dass nicht nur die EURO III-Normwert eingehalten werden können, sondern dass auch eine bedeutsamer Treibstoff- und Emissionsreduktion realisiert werden kann. Das Ziel, dem breiten Publikum - und somit den Konsumenten - Gas als sinnvoller alternativer Treibstoff positiv und schmackhaft näher zu bringen, ist näher gerückt.

Das **Klausenrennen Memorial 2002** wurde auf Initiative der Baudirektion des Kantons Glarus zum ersten Mal **CO₂-neutral** [8] durchgeführt. Mit der Umsetzung dieses Vorhabens wurde die Stiftung CLIPP (*Climate Protection Partnership*) beauftragt. Verschiedene Partner unterstützten das Projekt, insbesondere das Bundesamt für Energie, der Kanton Glarus, der *Gasverbund Mittelland* und die *Rinspeed AG*. CLIPP sollte zudem die Plattform Klausenrennen nutzen, um die Zuschauer und Medien über die Themen *CO₂-neutrale Veranstaltung* und *Alternative Antriebsformen* zu informieren. Mit verschiedenen Aktivitäten wie z.B. einem Medienanlass, einem Informationsstand am Klausenrennen oder Demonstrationen von Fahrzeugen mit Erdgas-, Elektro- oder Wasserstoffantrieb, konnten interessierte Personen zu einem sparsameren Umgang mit fossilen Energien sensibilisiert werden. Basierend auf dem Grundsatz *Reduzieren vor Kompensieren* wurden mit verschiedenen Massnahmen, insbesondere der Förderung der Anreise der Zuschauer mit öffentlichen Verkehrsmitteln, die CO₂-Emissionen reduziert. Trotz den Reduktionsmassnahmen bewirkte das Klausenrennen CO₂-Restemissionen in der Grössenordnung von 526 Tonnen. Diese Menge Kohlendioxid musste in einem Klimaschutzprojekt kompensiert werden, um die CO₂-Neutralität zu erreichen. Wie von verschiedenen Seiten gewünscht, wurde nach einem attraktiven Kompensationsprojekt im Berggebiet gesucht, welches für den Kanton Glarus eine Vorbildfunktion haben könnte. Durch einen finanziellen Beitrag an das Projekt *Fernwärmeheizung Kraftwerke Linth-Limmern (KLL)* können pro Jahr rund 45 Tonnen Heizöl resp. 141 Tonnen CO₂ eingespart werden. Die durch das Klausenrennen Memorial 2002 verursachten CO₂-Emissionen werden somit nach ungefähr vier Jahren kompensiert sein.

Das Projekt **NewRide** [9] baut die Promotion von Elektrozweirädern (E-Bikes und E-Scooters) auf und betreibt diese in der Folge. Gestartet wurde das Programm 2001 im Kanton Bern. Im Jahr 2002 konnte *NewRide* durch den Einbezug der Stadt Zürich (s. Fig. 8) und des Kantons Basel-Stadt wesentlich ausgeweitet werden. Im Vordergrund der Arbeiten standen die Zusammenarbeit mit Herstellern / Importeuren / Händlern sowie Verbesserungen im Bereich Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit. Durch die Entwicklung eines *NewRide*-Händler-Labels und den Aufbau eines schweizweiten Händlernetzes mit zirka 200 Anbietern etablierte sich eine fruchtbare und zukunftssträchtige Zusammenarbeit zwischen dem Programm, den Partnern in den Städten / Gemeinden und den Herstellern / Importeuren.



Figur 8: Probefahren und Promotion von Elektrozweiräder im Sommerhalbjahr jeden Donnerstag Nachmittag in Zürich an der Bahnhofstrasse / Rennweg

Die Kommunikation erfuhr durch die starke Verbesserung des Internetauftritts (ca. 16'500 Besuche) und die gesteigerte Pressepräsenz (ca. 25 Mio. Responses) einen relevanten Aufschwung. Hier gilt es für die Zukunft, die einzelnen Zielgruppen noch besser anzusprechen, ohne einseitig auf einzelne Kundensegmente zu setzen. Der Markt für elektrische Zweiräder stagnierte 2002, was sich zu einem grossen Teil durch die Verunsicherung potentieller Kunden wegen der finanziellen Problemen der Schweizer Hersteller erklären lässt. Mittlerweile hat sich diese Situation wieder ein wenig entschärft und die engagierten Produzenten konnten wesentlich Vertrauen zurückgewinnen. Für die Zukunft gilt es dieses Vertrauen weiter zu stärken, die Qualität weiter zu verbessern und für den Kunden auch die Kosten/Nutzen - Relation zu vergünstigen. In den ersten beiden Jahren wurden dank *NewRide* zusätzlich zirka 700 Fahrzeuge verkauft, was gemäss einer ersten Modellrechnung einer CO₂-Reduktion von

485 Tonnen entspricht. Zweifellos hat *NewRide* der Branche damit wichtige Impulse gegeben. Insgesamt konnten Effektivität und Effizienz im Rahmen des Netzwerkes *NewRide* 2002 gegenüber dem Vorjahr wesentlich verbessert werden. Allerdings bestehen bei einzelnen Gemeinden Verbesserungspotenziale. Das Projekt *Betriebe* wurde in der bisherigen Form eingestellt, da sich der eingeschlagene Weg als wenig erfolgsträchtig erwies. Im Rahmen eines Pilotversuchs soll 2003 eine integrale Mobilitätsberatung von Betrieben erprobt werden. Dank den intensiven Arbeiten von *NewRide* kann das Programm 2003 auf insgesamt 11 Kantone ausgeweitet werden.

Das Projekt **e-rent** [10] baut in der Gemeinde Wohlen BE einen Mietservice für Elektromobile auf. Im Jahr 2002 wurden die folgenden Aktivitäten durchgeführt:

- Aufbau der Projektorganisation: Arbeitsgruppe der Genossenschaft *Solkraftwerk Wohlen*
- Anschaffung von 2 Fahrzeugen: 1 Elektroroller Peugeot Scoot'elec, 1 Elektro-Auto CITROËN Saxo électrique
- Lancierung des Projektes in der Öffentlichkeit: *WohlenMobil*-Tage im Mai 2002; Info-Stand bei Einkaufszentrum Hinterkappelen August 2002, Beiträge im Gemeindeblatt.
- Festlegung und Inbetriebnahme der Fahrzeug-Stützpunkte: Standorte im bevölkerungsdichtesten Gebiet der Gemeinde (Hinterkappelen)
- Aufbau eines online Reservationssystems inkl. Aufbau der Homepage für *e-rent*: Buchungssystem von www.buchmich.ch, **Nutzung der Homepage von www.sokw.ch**
- Einführung von Nutzerinnen und Nutzern in die technische und administrative Nutzung des Angebots: Mietverträge, Reservations- und Fahrtenlisten, Instruktionen zur Nutzung der Fahrzeuge.

Per Ende 2002 sind ca. 15 Personen NutzerInnen des *e-rent* Angebots. Betrieb und Wartung sind sichergestellt. Das Projekt hat sich langsamer entwickelt als es im ursprünglichen Zeitplan vorgesehen worden ist. TeilnehmerInnen und gefahrene Kilometer liegen für 2002 unter den Erwartungen. Die Projektorganisation ist für 2003 nun soweit aufgebaut, dass eine Ausweitung des Service und eine Erhöhung der Teilnehmerzahl durch aktiveres Marketing möglich wird.

Novatlantis-Pilotregion Basel [11] erarbeitet Optionen für einen nachhaltigeren Fahrzeugverkehr in Basel, die sowohl machbar wie auch von der Basler Bevölkerung und anderen Interessensvertretern akzeptiert sind. Insbesondere

sollen Synergien zwischen dem vom *Gasverbund Mittelland* (GVM) unterstützten Ziel der *Industriellen Werke Basel* (IWB), bis 2010 ca. 1% ihres Gasabsatzes im Treibstoffsektor zu realisieren, dem Ziel der Ämter für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt und Basel-Land, den Energieverbrauch und die Emissionen des Fahrzeugverkehrs im Raum Basel zu senken, und dem Ziel des Bundesamts für Energie (BFE), die konkrete Umsetzung eines innovativen Fahrzeugparks beispielhaft anzugehen, hergestellt werden. Für eine Erfüllung der gemeinsamen Ziele ist kurz- und mittelfristig besonders der vermehrte Einsatz von energieeffizienten Erdgasfahrzeugen sinnvoll. Zur Vorbereitung eines langfristigen Wegs zu einer nachhaltigen Fahrzeugmobilität soll zusätzlich die mögliche Rolle von Wasserstoff als Treibstoff der Zukunft für Basel untersucht werden.

Die Resultate des Mobilitätsmoduls bezüglich diesen Fragen sollen am Ende des Projekts in drei strategische Berichte zusammengefasst werden: Einem Umsetzungskonzept *1% Gas für Fahrzeuge bis 2010*, einem Zukunftsszenario *Wasserstoff für Fahrzeuge*, und einem Leitbild *Akzeptierte Fahrzeuginnovation für Basel*. Zur Erarbeitung dieser Endprodukte für die Praxis sind folgende Arbeitsschritte geplant: ein Überblick über Erdgasfahrzeuge und über Wasserstoff als Treibstoff sollen das Potenzial dieser Optionen aufzeigen. Dieses soll in Fokusgruppen mit Bürgerinnen und Bürgern, und in Stakeholderdialogen mit wesentlichen Akteursgruppen diskutiert werden. Technologie- und Akzeptanz-Potenziale sollen dann mit Hilfe von Systemdynamik in praxisnahe Zukunftsszenarien zusammengeführt werden. Diese bilden die Grundlage für die oben erwähnten Strategieberichte am Ende des Projekts.

Im Rahmen des Projekts **CIM.02 – neue Mobilität** [12] wurden in der Stadt Biel während der EXPO.02 Anreize für eine verstärkte Nutzung der öffentlicher Verkehrsmittel erprobt. Zusätzlich wurden verschiedene innovative, umweltfreundliche Verkehrssysteme angeboten: 25 vierplätzigere, von der Stadt Biel und der *Caisse Commune* betriebene Elektromobile, die an 38 Standorten in der Stadt Biel in Selbstbedienung zu mieten waren; 20 von der *RATP* betriebene elektrische Kleinbusse mit 7 Plätzen für folgende Dienstleistungen: Stadtrundfahrt auf einer festgelegten Route, Gruppentransport auf Bestellung und schliesslich der Personentransport von und zu den für die Expo.02- Parkplätzen, eine gemeinsam von *Pedaline Sàrl* und *Vélo-Courrier* betriebene Flotte von 20 Velotaxis, 25 von der Stadt Biel betriebene E-Bikes (Flyer) und 50 Elektroscooter (Sprinty). Weiter wurde ein Infocenter für Mobilität einge-

richtet und betrieben. Durch diese und weitere, im Verkehrsplan Biel-Expo.02 beschriebene Massnahmen, konnte auch während der Expo.02 der Verkehr zufriedenstellend abgewickelt werden.

Im Jahr 1992 entwickelte die *Sytrel SA* in Colomier mit der Unterstützung des BFE ein elektrisches Mofa. Damit und mit drei weiteren im Jahre 1996 nachgebauten Fahrzeugen konnten über einige Jahre hinweg wertvolle technische Erfahrungen mit verschiedenen Antriebssystemen und Akkumulatoren gesammelt werden. Auf dieser Basis fasste *Sytrel* die Produktion kommerzieller Elektromofas in China ins Auge und gründete 2001 mit *Yuxing Science & Developing Corporation* in Jinan ein Joint Venture mit dem Namen *Sytrel International Inc.* Zur Erreichung der notwendigen Ausführungsqualität wurden für die mechanischen Kleinteile spezifische Werkzeuge, Lehren und Spritzgussformen hergestellt. Für die grösseren Karosserieformteile musste aus Kostengründen noch Glasfaser verwendet werden. Das erste kommerzielle Prototyp-Fahrzeug wurde im Februar 2002 in Jinan im Strassenverkehr erfolgreich getestet. Anschliessend begann der Bau der übrigen Fahrzeuge, von denen 12 Exemplare des nun **Mobilec** [13] genannten Mofas zur Homolegation und Vorführung in die Schweiz geliefert werden. Ziel von *Sytrel International* ist es, künftig einen bestimmten Segment im Personennahverkehr mit diesen umweltfreundlichen Nahverkehrsmittel ausrüsten zu können.

Die Gemeinde Muttenz BL setzt ihre umwelt- und energiepolitisches Engagement u.A. mit dem Projekt **Mobilität an Schulen** [14] fort. In diesem Projekt soll die Sensibilisierung der Schüler und Studenten für schonende und energieeffiziente Mobilitätsformen erreicht werden. Aktivitäten in diesem Rahmen waren eine Ausstellung mit Hintergrundinformation zur Mobilität, eine Umfrage zur Verkehrsmittelnutzung, E-Bike-Touren und eine Fahrzeugausstellung.

Die Basler Firma *VeloCity* entwickelte Komponenten des bestehenden E-Bikes **Dolphin** [15] in einer Entwicklungsmatrix entsprechend der Kundenwünschen weiter. Das beliebte Design des *Dolphin*, sowie die führenden Leistungsmerkmale (mehrere Testberichte) zeugen davon, dass diese kundenorientierte Entwicklung erfolgreich umgesetzt wurde. Aufgrund der beschränkten finanziellen Mittel musste auf Herstellungsverfahren mit hohen Werkzeugkosten verzichtet werden (Spritz- und Druckguss). Für alle Bauteile konnten jedoch z.T. sehr kreative alternative Lösungen mit geringen Investitionen in den Werkzeugbau gefunden werden. Die Abwicklung der Service-Arbeiten am Fahrrad lokal beim Händler und am Batteriekof-

fer zentral beim Hersteller konnte von Anfang an berücksichtigt und erfolgreich in die Entwicklung integriert werden. Das Kostensenkungspotential des in seiner Funktion sehr einfach aufgebauten Antriebssystems konnte ausgeschöpft werden, allerdings unter Verzicht auf eine integrative Lösung mit hohem Industrialisierungsgrad. Aus Kostengründen wurde eine sehr einfache, auf der Verwendung eines bestehenden Getriebes basierende Lösung realisiert.

Das Ingenieurbüro *Kyburz AG* in Freienstein entwickelte das fortschrittliches Seniorenmobil **CLASSIC PLUS** [16] (s. Fig. 9). Dieses ist speziell auf die Bedürfnisse von Senioren ausgerichtet und ermöglicht ihnen eine energieeffiziente, sichere Mobilität an Stelle des herkömmlichen Personenwagens. Das Fahrzeug wurde auch an der *REHA-CARE 02* in Düsseldorf der Öffentlichkeit vorgestellt. Verschiedene Komponenten dieser Entwicklung konnten zum Patent angemeldet werden: Sitzfederung, Scheibenwischer und eine elektromechanische Servobremse.



Figur 9: Der Gesamtbundesrat bei seinem Jahresausflug zu Besuch bei der Firma *Classic*

Die *DemoEx GmbH* in Ebikon entwickelt ein **Demo-Trottinett** [17] mit Nutzbremse für die Energierückuperation. Seit Ende November existiert eine provisorisch zusammengebaute fahrfähige Vorstufe des Prototyps. Diese erlaubt nun ein praxisnahes Austesten und Optimieren. Im Verkehrshaus und später auch in anderen Ausstellungen sollen Kinder und Erwachsene dieses *Trottinett* als ein von so genanntes *Erfahrzeug* in Sachen Energierückgewinnung beim Bremsen spielerisch benützen können. Ein entsprechend adaptiertes Einsatz-Szenario wird mit Blick auf die sich demnächst konkretisierenden neuen Leistungsdaten des *Trottinetts* und in Zusammenarbeit mit dem Verkehrshaus entworfen.

Seit Mai 2000 verkehrt die **Solarfahre Helio** [18] zwischen den Gemeinden Gaienhofen (D) und

Steckborn (CH) am Untersee des Bodensees (s. Fig. 10). Im Berichtsjahr konnte die Fähre wieder an 73 Tagen zwischen den beiden Ländern verkehren. Durch eine Fahrplanumstellung konnte das Schiff zusätzlich für naturkundliche und energietechnische Exkursionen eingesetzt werden. Seit 2002 organisiert die *Bodensee-Solarschiffahrt gemeinnützige GmbH* das Solarschiff-Netzwerk auf dem Bodensee. Neben der Traditionslinie Gaienhofen-Steckborn wurden neue Linien probeweise bedient. So wurde zwischen der Insel Reichenau und Mannenbach eine weitere grenzüberschreitende Solarfährlinie eingerichtet. In Kreuzlingen wurde mit einem weiteren Solarschiff ein uferparalleler Liniendienst eingerichtet. Insgesamt konnten 2002 über 6500 Fahrgäste und 2500 Velos auf der Solarfähre *Helio* transportiert werden. Besonderen Wert wurde auf naturkundliche Ausfahrten gelegt. Die Solarfähre wurde von 32 Schulklassen als *Schwimmendes Klassenzimmer* genutzt. Insgesamt konnten über 20.000 Menschen das Vergnügen einer Solarschiffahrt genießen. 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.



Figur 10: Die Solarfähre Helio erschliesst einen sanften Tourismus

AKKUMULATOREN

An zwei Medienanlässen im Juni und Dezember 2002 stellte die HTA Zentralschweiz den **TOHYCO-Rider Kleinbus** [19a] mit Superkondensatoren (SCAP) der Öffentlichkeit vor (s. Fig. 11). Damit ist ein wichtiges Ziel im Gesamtprojekt, die Machbarkeit dieses einzigartigen Konzeptes, SCAP und berührungslose Schnellladung in einer Synergie zu nutzen, erreicht. In der ersten gross-

angelegten Präsentation auf dem Bahnhofplatz Luzern wurde die eigentliche Taufe vorgenommen. Demonstrationsfahrten waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich. Der fahrbare Kleinbus legte dann Ende 2002 Zeugnis von seiner Funktionstüchtigkeit ab. Bis zu diesem Zeitpunkt galt es aber noch, viele kleinere technische Probleme zu bereinigen.

Der Umfang und die Komplexität des P+D-Projekts stellte unter den Bedingungen an einer Fachhochschule eine echte Herausforderung dar, galt es doch, nebst den eigentlichen Problemen der SCAP-Ankopplung sehr viele Aufgaben im Zusammenhang mit den Hilfsbetrieben zu lösen. Deshalb mussten terminliche Verzögerungen in Kauf genommen werden. Im Kerngebiet der SCAPs haben sich die Eckdaten während der Projektdauer derart verbessert, dass der Bus im geplanten Endausbau nur noch mit 5 statt wie ursprünglich geplant mit 10 *Super-Akkumulator-Modulen* auskommt. Darin, wie auch in der Preisentwicklung der SCAP, manifestiert sich die rasante Entwicklung dieser Technologie. Überlappend wurde bereits die nächste Etappe des Projektes vorbereitet. Erfreulicherweise darf damit gerechnet werden, dass der TOHYCO-Rider ab Frühjahr 2004 in einem Testbetrieb in Luzern für die Strecke Bahnhof-Verkehrshaus zum Einsatz kommen wird. Der zuverlässige und sichere Einsatz des TOHYCO-Riders wird 2003 eine neue grosse Herausforderung darstellen.

Ein weiteres Projekt der HTA Zentralschweiz ist das **Super-Akkumulator-Module (SAM)** [19b], einer Kombination von SCAP, Batterien und der zugehörigen Elektronik. Das Projekt konnte in diesem Jahr abgeschlossen werden. Den zentralen und neuen Teil stellen die SCAP dar. Die leistungselektronische Ankopplung der SCAP als weiterentwickelter Teil von SAM, ein Kerngebiet der HTA-Luzern, ist der Schwerpunkt dieses Projektes. Das Resultat wird anhand eines Kickboards demonstriert und ist exemplarisch für viele weitere SCAP-Anwendungen in dieser Leistungsklasse. Ausgangspunkt des Projekts war ein mit einem Akku-Antrieb ausgerüstetes Kickboard, das grösstenteils von der Industrie finanziert wurde. Das Kickboard ist für SCAP umgerüstet worden. Die Energie kann ohne Verwendung eines Ladegerätes aus dem Ladezustand Null durch reines, kaum spürbares Antreten des Kickboards in den SCAP gespeichert werden und steht dann für eine Gleitphase von einigen Minuten zur Verfügung. Die Lebensdauer des Speichers ist dabei praktisch unendlich. Das in sich geschlossene System muss nie an die Steckdose und ist damit sehr wartungsfreundlich. Der Kickboard-Prototyp befindet sich

in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstand und demonstriert eindrücklich die erreichten Ziele. Die geleistete Weiterentwicklung der Elektronik für SAM anhand des Kickboards, wie sie vom BFE in diesem Projekt mitfinanziert wurde, ist ein wichtiger Beitrag für alle Anwendungen mit SCAP.



Figur 11: Der Tohyco-Rider anlässlich des Medienanlasses vom 25.6.02 am Bahnhof in Luzern

Im Projekt **OPAL** [20a] der Automobilabteilung der HTA Biel wird die Lebensdauer von Bleibatterien optimiert. Während einer ersten Testphase wurde festgestellt, dass Messung und Überwachung der Gesamtspannung allein ungenügend ist. Ideal ist die Überwachung jeder einzelnen Zelle, oder mindestens jedes einzelnen 12 V Blockes.

Weil dies aus Kostengründen kaum realisiert werden kann, empfiehlt sich die Verwendung eines Mittelabgriffes für die Spannungsmessung. Damit kann die Spannung der ersten 7 Batterieblöcke mit derjenigen der nächsten 7 Batterieblöcken verglichen werden. Bei einer Differenz von 2 Volt oder mehr liegt ein Fehler vor. Die Ladespannung muss in Funktion der Batterietemperatur geregelt werden und eine Tiefentladung der Batterie ist zu vermeiden!

Das Projekt **ALBOCCA** [20b] der HTA Biel hat die Erhöhung der Lebensdauer von Batterien in städtischen Linienbussen zum Ziel. Diese Batterien erreichen in der Praxis eine Lebensdauer von lediglich etwa 1,5 Jahren. Demgegenüber erreichen die Batterien in Personenwagen eine Lebensdauer von 4 bis 5 Jahren. Entgegen der ersten Annahme ist nicht der Anlassvorgang der Grund für diese kurze Lebensdauer, sondern der Betrieb von Nebenaggregaten im Bus an den Endstationen. Dort wird der Motor ausgeschaltet und diese Verbraucher werden von der Batterie gespeist. Die Stromstärke beträgt dabei 20 bis 30 A. Bei einem Linienbus ergeben sich so pro Jahr ca. 15'000 Teilentladungen. Auch wenn diese Entladungen nur einen kleinen Teil der Entladekapazität betragen, führt dies zu einer begrenzten Lebensdauer der Batterie. Bereits heute werden aus diesem Grunde bei Linienbussen zyklensfeste Traktionsbatterien anstelle von Starterbatterien eingesetzt. Ein weiteres Problem zeigte sich beim relativ hohen Stromverbrauch der Billetautomaten während der Nacht. Nun besteht die Absicht, den Stromverbrauch an den Endstationen mit Hilfe von Hochleistungskondensatoren abzudecken und so die Anzahl der Entladevorgänge der Batterie massiv zu verringern. An der HTA in Biel wird gegenwärtig ein Prototyp aufgebaut, welcher die Funktionsfähigkeit eines derartigen Systems demonstrieren soll.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Im Berichtsjahr wurden mehrere hervorragende Projekte abgeschlossen. Stellvertretend erwähnt sind die Projekte *Modultec II*, *Bresa*, *Swiss Dual Fuel*, *Intellibike* und *Zebrabatterie*. Unter dem Gesichtspunkt der aktuellen wirtschaftlichen Krise fällt deren Umsetzung jedoch nicht leicht. Umgekehrt ist die Euphorie bezüglich der raschen und breiten Markteinführung der Brennstoffzelle verflogen. Die Folge hiervon ist u. A. eine steigende Bedeutung der Effizienztechnologien bei den thermischen und hybriden Motoren und von Erdgas als Treibstoff.

Auf internationaler Ebene war der erfolgreiche Auftritt des Volkswagen 1 Liter Autos eines der herausragenden Ereignisse. Dieses Fahrzeug zeigte die Möglichkeiten moderner individueller Nahverkehrsmittel spektakulär auf. Es ist aber zu wünschen, dass solch fortschrittliche Technologie künftig auch in familientauglichen Fahrzeugen umgesetzt wird. Eine solches Fahrzeug, z.B. in Gestalt eines Vans, würde einen Verbrauch von ca. 3 Liter pro 100 km erzielen und gegenüber dem Modelljahr 1996 wäre ein Faktor 4 Realität.

Der Weg in die Zukunft bleibt auch in den kommenden Jahren spannend. Erdgas als Treibstoff, hybride Technologien, verbesserte Systeme bei den Diesel, wie auch den Ottomotoren versprechen weitere Effizienzgewinne und CO₂-

Einsparpotential. Die Markteinführung der 42 Volt Bordnetzspannung steht unmittelbar bevor. Dieses System erschliesst in vielen Aggregaten ein beachtliches Sparpotential, ebenso wie die Energierückgewinnung und die Motorabschaltung.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden

- [1] A. Röder, PSI, *Villigen*: **Studie zu den Treibhausgasemissionen der zukünftigen (bis 2050) europäischen Stromerzeugung** (SB)
- [2] M. Horlacher, (thomas.efler@bluewin.ch) Horlacher Möhlin: **Modultec II – Modultechnologie für Leichtmobile**, (SB), www.horlacher.com
- [3] L. Guzzella, (guzzella@imrt.mavt.ethz.ch) ETH-Zürich: **PALOS II Optimale Antriebssysteme für Leichtfahrzeuge** (JB), www.ethz.ch
- [4] P. Dietrich, (philipp.dietrich@psi.ch) PSI, *Villigen*: **BRESA – familientauglicher PW mit Brennstoffzelle** (SB), www.psi.ch
- [5] C. Dustmann: (cdustmann@mes-dea.ch) MES-DEA, *Stabio*: **Zebra Batterie** (SB) www.cebi.com

Liste der P+D-Projekte

- [6] Ch. Bach (christian.bach@empa.ch), EMPA *Dübendorf*: **Clean Engine Vehicle** (JB), www.empa.ch/abt137
- [7] F. Rinderknecht, (frm@rinspeed.com), Rinspeed, *Zumikon*: **Swiss Dual-Fuel** (SB) www.rinspeed.com
- [8] O. Johner / B. Rigassi (barbara.rigassi@bruggerconsulting.ch), Brugger, Hanser und Partner, *Zürich*: **Klausen Memorial 2002 CO₂ neutral** (SB), www.bruggerconsulting.ch
- [9] H. Hofmann (heidi.hofmann@ikaoe.unibe.ch) Universität *Bern*: **NewRide** (JB), www.newride.ch
- [10] R. Kiener, (r.kiener@gmx.ch) Gemeinde *Wohlen*: **e-rent** (JB)
- [11] St. Lienin / B. Kasemir (stephan.lienin@psi.ch), PSI, *Villigen*: **Novatlantis-Pilotregion Basel** (JB)
- [12] F. Kuonen (francois.kuonen@biel-bienne.ch) Commune de *Bienne*: **CIM.02 – neue Mobilität** (JB)
- [13] P. Eberli, ([sytreli@bluewin.ch](mailto:sytrel@bluewin.ch)) Sytreli, *Colombier*: **Mobilec** (SB)
- [14] P. Enzmann, Gemeindeverwaltung *Muttenz*: **Mobilität an Schulen** (JB)
- [15] M. Kutter, Velocity, *Basel*: **Dolphin** (SB)
- [16] M. Kyburz, (martin.kyburz@datacomm.ch) Classic AG, *Freienstein*: **Classic Plus** (SB) www.kyburz-classic.ch
- [17] U. Aeschbacher, (huber.demoex@datacomm.ch) DemoEx GmbH, *Ebikon*: **Demo-Trottinet** (JB)
- [18] J. Rohrer, (jakob.rohrer@bluewin.ch), Verein *Bodensee*, *Steckborn*: **Solarfähre Helio** (JB), <http://www.solarfaehre.net>
- [19] 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

- [20] K. Meier-Engel (Karl.Meier@hta-bi.bfh.ch) HTA *Biel*: **a) OPAL** (JB) • **b) ALBOCCA** (JB)
- [21] U. Schwegler, (ursschwegler@bluewin.ch) e'mobile, *Fischingen*: **a) CleanerDrive** (JB) • **b) ELEDRIIVE** (B), <http://www.e-mobile.ch>

Referenzen

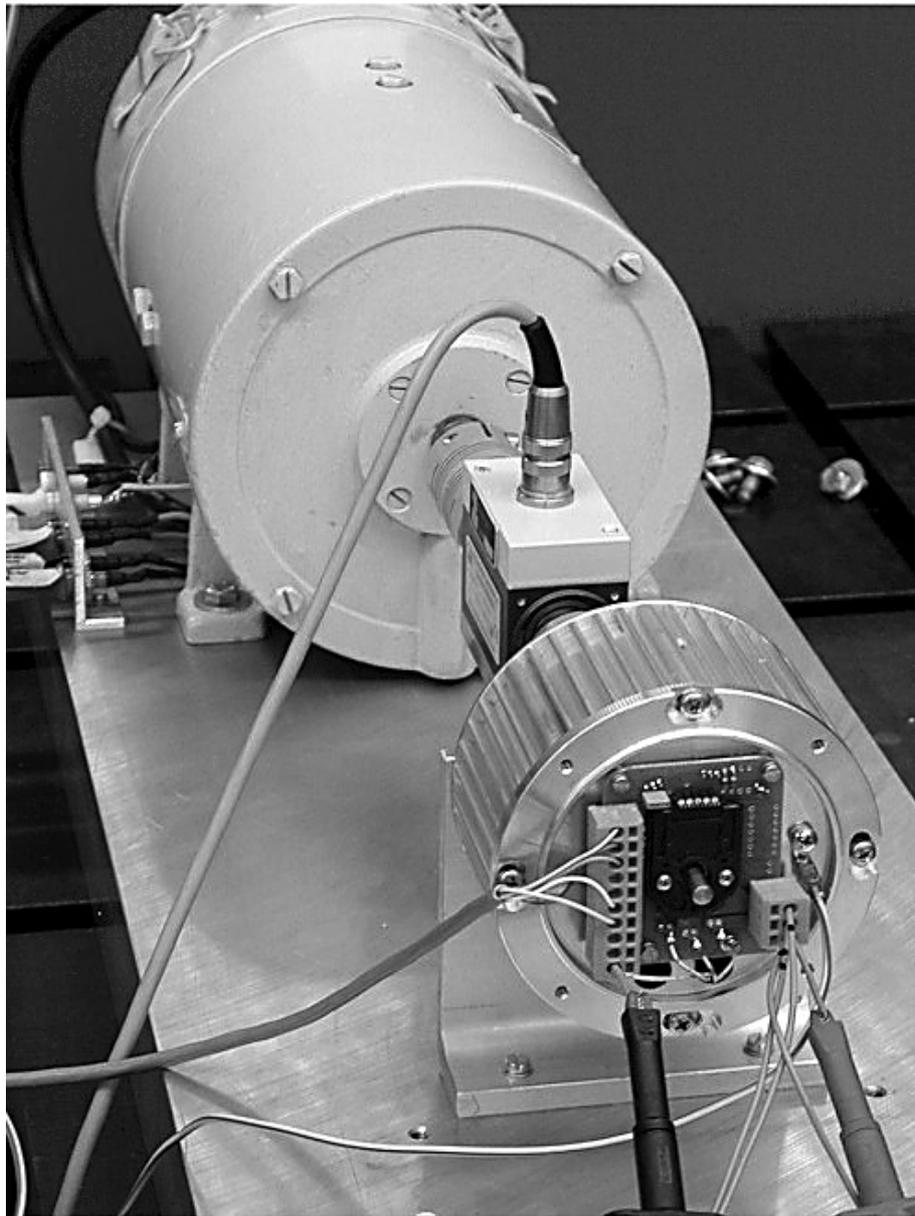
- [22] M. Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch) BFE, *Bern*: **Programme Verkehr und Akkumulatoren/ Supercaps 2000 – 2003** <http://www.energie-schweiz.ch/bfe/de/verkehr/forschung/>

ELEKTRIZITÄT

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2002

Roland Brüniger

roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch



Energiesparmotor (vorne) beim Austesten an der Fachhochschule Luzern

(Quelle: Circle Motor AG)

Falls alle in der Schweiz mit Steuergeräten betriebenen Asynchronmotoren mit einer Leistung grösser als 1 kW mit dem neuen Energiesparmotor ersetzt würden, könnten pro Jahr 75 GWh eingespart werden.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das **Forschungsprogramm Elektrizität** [27] unterstützt mit seinen Aktivitäten einen effizienten Einsatz der elektrischen Energie von der Erzeugung über die Verteilung bis zur rationellen Verwendung. Damit will das Programm neue längerfristige Wege aufzeigen, aber insbesondere auch einen direkten Beitrag zum Ziel von EnergieSchweiz leisten, das Wachstum des Elektrizitätsverbrauchs bis zum Jahr 2010 in bezug aufs Jahr 2000 auf maximal 5% zu beschränken. Die im Forschungsprogramm erarbeiteten Wissensgrundlagen werden deshalb rasch möglichst der nachhaltigen Umsetzung zugeführt. Inhaltlich strukturiert sich das Programm in die Schwerpunkte *elektrische Verteilung, Hochtemperatursupraleitung, Energie- und Informationstechnik, elektrische Antriebe und Motoren sowie Geräte/Diverses*.

Aufgrund der im Herbst 2002 durchgeführten Abstimmung über das Elektrizitätsmarktgesetz (EMG) war der Bereich **elektrische Verteilung** bei der Bestimmung fachtechnischer Ziele von grosser Unsicherheit geprägt. Die Branche konzentrierte ihre Kräfte weitgehend auf abstimmungstechnische Aktivitäten und auf das Marketing. Als Zielsetzung wurde deshalb angestrebt, eine gemeinsame Ausbildungsplattform mit dem Verband der Elektrizitätswirtschaft (VSE) formal zu etablieren, um gewonnene Forschungserkenntnisse effizient und zielgerichtet in der Branche umzusetzen. Ebenfalls galt es, fachtechnische Vorbereitungen für anstehende Forschungsarbeiten durchzuführen.

Die Zielsetzung im technologie-orientierten Schwerpunkt **Hochtemperatursupraleitung in der Energietechnik** beinhaltet einerseits die umfassende Informationsverteilung innerhalb der Schweiz über die nationalen und insbesondere die internationalen Aktivitäten und andererseits die massvolle Unterstützung von nationalen Projekten. Nachdem im Jahr 2001 einer Projektinitiierung unter Beteiligung der schweizerischen Industrie kein Erfolg beschieden war, wurde diese Zielsetzung unverändert für 2002 übernommen.

Ein Ende der rasanten Weiterentwicklung und Verbreitung der **Informations- und Kommunikationstechnik** ist zur Zeit nicht absehbar. Die Anstrengungen in diesen Bereichen richten sich aufgrund der in der Schweiz weitgehend fehlenden produzierenden Industrie stark international aus. Die Zielsetzung besteht deshalb im Pflegen und Vertiefen von internationalen Beziehungen zur abgestimmten Umsetzung energiesparender Massnahmen sowie in der Analyse und dem Aufzeigen von Effizienzmassnahmen. Dazu gehören insbesondere die Lancierung eines Industrieprojekts zum Server-Schalten sowie die begleitende Untersuchung, inwiefern das Schalten die Lebensdauer beeinflusst. Zudem ist beabsichtigt, Grundlagen im Bereich von Industrie-Steuerungen zu erarbeiten.

Elektrische Antriebe und Motoren machen gegen 45% des Stromverbrauchs der Schweiz aus. In diesem Bereich kann der grösste Beitrag zur Elektrizität bezogenen Zielsetzung von EnergieSchweiz erbracht werden. Die Zielsetzung liegt deshalb darin, in klar abgrenzbaren Bereichen Pilotprojekte in verschiedenen Industriebranchen mit Multiplikationspotential zu initiieren. Zudem sind energieeffiziente Technologien im Antriebsbereich zu fördern. Schliesslich sind gemeinsam mit der herstellenden und vertreibenden Motoren-Branche die Grundlagen für eine Zielvereinbarung zur Förderung von effizienten Motoren zu schaffen. Dabei sollen die internationalen Erfahrungen mitberücksichtigt und mit der nationalen Umsetzung abgestimmt werden.

Neben der klassischen Sprach- und Datenvernetzung werden vermehrt auch **Geräte**, speziell Haushaltsgeräte vernetzt, wodurch deren Energieverbrauch tendenziell eher steigen dürfte. Die Ziele in diesem Bereich bestehen im Wesentlichen in Aktivitäten zur Erkenntnisvertiefung im Bereich der Haushaltsvernetzung und im Aufgreifen der Standby-Thematik bei Haushaltsgeräten.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

ELEKTRISCHE VERTEILUNG

Die Abstimmung zum EMG war im Jahr 2002 das beherrschende Thema. Die Elektrizitätswirtschaft konzentrierte ihre Kräfte weitgehend auf

die Volksabstimmung, was bewirkte, dass die Branche kaum über Ressourcen für die Bearbeitung technisch orientierter Forschungsthemen verfügte. Zwar konnte die zwischen dem BFE und

dem VSE vorgesehene Vereinbarung bezüglich einer **Ausbildungskooperation** unterschriftsreif ausgearbeitet werden. Nach dem negativen Abstimmungsergebnis befindet sich die Branche nun aber in einem Prozess der Neuorientierung, weshalb der VSE im Moment auf eine Unterzeichnung dieser Vereinbarung verzichtet.

Tendenziell wird es für Hochschulen zunehmend schwieriger, Studenten für ein Studium auf dem Gebiet der elektrischen Übertragung und Verteilung zu motivieren. Mit dem Projekt **Démonstrateur pour réseau avec transport d'énergie en courant continue** [1] beabsichtigt die Fachhochschule Yverdon, ein Modell einer Gleichstromübertragungsstrecke aufzubauen, um errechnete Resultate aus numerischen Simulationen messtechnisch zu verifizieren. Die Dimensionierung der verschiedenen Komponenten ist 2002 abgeschlossen worden.

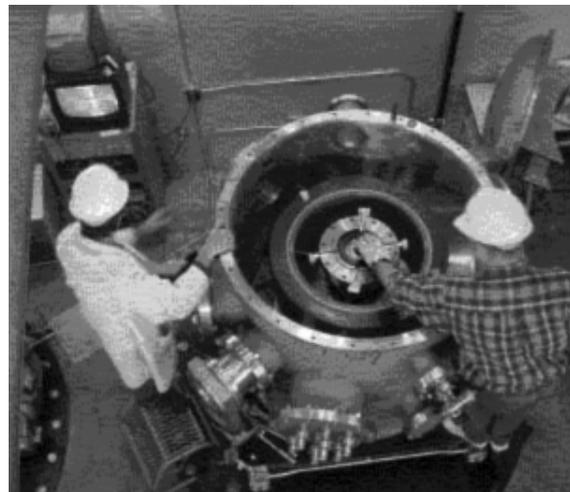
Die Ermittlung der technischen Randbedingungen zur Nutzung von dezentralen Energieerzeugungsanlagen (DEA) im Verteilnetz sowie der ökonomischen Auswirkungen sind Inhalte des Forschungsprojekts **Zunahme der dezentralen Energieerzeugungsanlagen in Verteilnetzen** [2a]. Im Jahr 2002 wurden relevante Szenarien für die aktuelle und die mögliche zukünftige Situation der DEA erarbeitet. Ferner wurden reale Netzdaten beschafft, damit die Effekte der Zunahme der DEA möglichst wirklichkeitsgetreu simuliert werden können. Die Modelle für die Simulation der DEA im Verteilnetz konnten definiert und erste Simulationen realer Netze durchgeführt werden. Für die Simulationen stehen dank kooperierender Elektrizitätswerke diverse schweizerische Netze zur Verfügung.

Mit dem Projekt **Wechselstromkorrosion an Pipelines** [3] wird der Einfluss von elektrischen Energieübertragungsleitungen auf die Korrosionsbildung an Erdgasleitungen untersucht. An mehreren Standorten wurden Feldmessungen durchgeführt. Parallel dazu wurden die dazugehörigen Messmethoden weiterentwickelt.

HOCHTEMPERATURSUPRALEITUNG (HTSL)

Ziel der schweizerischen Teilnahme am **Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector** [4] der Internationalen Energie Agentur (IEA) ist eine möglichst umfassende Information über die internationalen Aktivitäten auf dem Gebiet der Hochtemperatursupraleitung (HTSL). Im Jahr 2002 fanden zwei IEA-Informationstreffen statt. Das erste war vor allem dem

Thema der Kühlung von Leitern in Energieanlagen gewidmet. Beim zweiten Treffen war das Hauptthema die Messung der Stromqualität im elektrischen Netz sowie deren statistische Erfassung. Obwohl das Stromnetz in der Schweiz eine wesentlich höhere Stromqualität aufweist als in den untersuchten USA, kommt diesem Thema auch hier eine wachsende Bedeutung zu. Als Lösung dieser Probleme bieten sich supraleitende Schwungräder an. Boeing (USA) hat erfolgreich ein 3kW-Schwungrad getestet (siehe Fig. 1), dessen möglicher Testeinsatz gegenwärtig als Thema eines separaten IEA-Projekts geprüft wird. Alle Informationen wurden bedarfsgerecht innerhalb der Schweiz verteilt und im alljährlich stattfindenden *HTSL-Statusseminar* ausführlich kommentiert.



Figur 1: HTSL-Prototyp-Schwungrad von Boeing im Test (Quelle: Boeing, USA)

Supraleitende Strombegrenzer (SSB) nutzen den Übergang des Supraleiters vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand. Die kleine Impedanz eines SSB im supraleitenden Normalbetrieb erlaubt die Realisation von an sich widersprüchlichen Forderungen nach kleiner Netzimpedanz bei gleichzeitig kleinen Kurzschlussströmen. Mit dem Projekt **Marktpotential von supraleitenden Strombegrenzern** [5] wird eine praxisorientierte Übersicht über die Anwendungsmöglichkeiten von SSB und Identifikation der vielversprechendsten Anwendungen unter Berücksichtigung der derzeitigen technischen Realisierungsmöglichkeiten durchgeführt. Ebenfalls werden die vom Markt geforderten technischen Anforderungen zusammengestellt. Die im Jahr 2002 durchgeführten Arbeiten zeigten, dass je nach Situation durch den Einsatz eines SSB ein beachtliches Kosteneinsparpotential realisiert werden könnte. Die

technischen Eigenschaften von heute realisierbaren Strombegrenzern erfüllen zwar die Anforderungen von Anwendungen in Netzkupplungen, müssen aber für den Einsatz in Einspeisungen und Abgängen in Bezug auf Begrenzungscharakteristik und Verfügbarkeit nach einem Kurzschluss noch verbessert werden.

ENERGIE- UND INFORMATIONSTECHNIK

Der Anteil der Informationstechnik am Stromverbrauch in der Schweiz liegt bei etwa 10% mit klar steigender Tendenz. Im Rahmen des **Kompetenzzentrums Energie und Informationstechnik** [6a] stand im laufenden Jahr die Förderung der Energieeffizienz bei den neuen Informations- und Kommunikationstechnologien – insbesondere bei der Vernetzung der Geräte und der Internetnutzung – durch möglichst konkrete Aktionen im Zentrum. Zudem wurde die öffentlich zugängliche Dokumentendatenbank (www.biblioite.ethz.ch) aktualisiert.

Im Projekt **Energieeffizienz von Computer-Netzgeräten** [6b] wurde festgestellt, dass der Wirkungsgrad von Netzgeräten für Computer bei einer Auslastung der Netzgeräte von über 20% zwischen 60% und 80% liegt. Bei tieferer Auslastung sinkt der Wirkungsgrad rasch ab. Das benötigte Spannungsniveau auf der Ebene der Prozessoren beträgt heute nur noch 1.5 V und wird in Zukunft weiter sinken. Dazu wird die im Netzgerät produzierte Gleichspannung – typischerweise 12 V und 5 V oder 3.3 V - unmittelbar beim Endverbraucher nochmals auf ein tieferes Niveau transformiert. Die wichtigsten technischen Massnahmen zur Effizienz-Steigerung der Stromversorgung liegen in der optimalen Geräte-Auslegung bezüglich effektivem Leistungsbedarf und in einer separat ausgelegten, energieoptimierten Stromversorgung für den Bereitschafts- oder Standby-Betriebszustand. Das technische Stromeinsparpotential dieser beiden Massnahmen liegt für PCs bei einem Drittel des heutigen Stromverbrauchs. Auf politischer Ebene werden zwei prioritäre Stossrichtungen empfohlen, nämlich die Einführung einer Energiedeklaration für Netzgeräte und die Verschärfung der Anforderungen an den maximalen Leistungsbezug von IT-Geräten im Bereitschafts-, Standby-, On- und Off-Zustand.

Server sind rund um die Uhr in Betrieb, obwohl sie in der Nacht und an Wochenenden speziell in Klein- und Mittelbetrieben nur in Ausnahmesituationen genutzt werden. Mit der Studie **Stromeinsparpotential durch Schalten von Servern** [7a] konnte der Nachweis erbracht

werden, dass in der Schweiz durch ein bedarfsgerechtes Schalten von KMU-Servern (Bestand etwa 117'000 Server) nachts und am Wochenende jährlich etwa 90 GWh eingespart werden könnten. Da dies in der EU sogar einem Wert von 2'000 GWh entspricht, wurden diese Zahlen auch an internationalen Konferenzen präsentiert. Aufgrund der grossen internationalen Beachtung, dürften damit wichtige Grundlagen für regulatorische Massnahmen gesetzt werden. Mit dem Ziel, eine möglichst hohe Systemunabhängigkeit und Marktkonformität zu erreichen, wird auf der Basis eines kostengünstigen Embedded Webserver im Projekt **Energieeffizientes Servermanagement** [8] eine Lösung entwickelt, die EDV-Server zu vorgegebenen Tageszeiten automatisch herunter- und heraufführt. Dazu wurde ein technisches Pflichtenheft erstellt und unterschiedliche Systeme evaluiert. Von zwei möglichen Systemen wurden Muster beschafft und mit dem Aufbau von Funktionsmustern begonnen, um die technische Machbarkeit zu belegen. Flankierend wurde schliesslich das Projekt **Auswirkungen von periodischem Ein- und Ausschalten auf die Server-Hardware-Zuverlässigkeit** [9] gestartet, um die Frage, ob periodisches Schalten eines Servers einen Einfluss auf seine Lebensdauer hat, wissenschaftlich zu klären.

Effiziente *Power Management-Funktionen*, wie sie heute bei Laptops, PCs und Bildschirmen üblich sind, sollten auch bei Servern und Netzwerkkomponenten zum Einsatz kommen und bei der Auslieferung optimiert installiert sein. Indem Bund, Kantone und Gemeinden bei ihren Ausschreibungen solche Funktionen verlangen, entsteht ein Druck auf die Hersteller, ihre Geräte zu verbessern. Deshalb werden im Projekt **Ausschreibungsunterlagen im Server, PC- und Netzwerkbereich** [7b] Mustertexte erarbeitet, die bei Ausschreibungen der öffentlichen Hand und bei privaten Grosseinkäufem herbeigezogen werden können, um einen Marktdruck hin zu energieeffizienteren Geräten im Server-, PC- und Netzwerkbereich zu erzeugen.

Das Ziel des Projekts **Energieeffizienz von USV-Anlagen** [2b] besteht darin, die im abgeschlossenen Projekt *Parameteridentifikation und Messverfahren für USV-Anlagen* erarbeiteten Grundlagen über die Auslegung, Qualität, Energieeffizienz und den Betrieb von USV-Anlagen mit den Standby-Verlusten zu erweitern und für die Anwendung in den Ländern der Europäischen Union aufzubereiten. Dazu wurde eine bestehende Industrie-Begleitgruppe reaktiviert, die relevanten Dokumente ins Englische übersetzt und Untersuchungen über das technische Einbringen

der Standby-Thematik in die Normierungsgremien angegangen.

Erstmals wurde der Stromverbrauch eines vernetzten/intelligenten Hauses im Projekt **Energieanalyse FuturLife-Haus** [7c] detailliert gemessen. Insgesamt liegt der Stromverbrauch um mehr als einen Faktor 3 über dem Stromverbrauch eines durchschnittlichen, nicht vernetzten Hauses. Die zentrale Infrastruktur für die Vernetzung (Server) und die weiteren, zur Vernetzung notwendigen Geräte verbrauchen je etwa den Strom eines durchschnittlichen Hauses. Mit relativ einfachen Massnahmen können diese vernetzungsbedingten Verbrauchswerte um 95% (zentrale Infrastruktur) und um 80% (weitere Geräte) reduziert werden (z.B. durch Betrieb ohne USV-Anlage, Nutzung eines Powermanagements). Der Strommehrerverbrauch durch die Vernetzung bleibt jedoch signifikant und könnte in den kommenden Jahren zu einem Wachstum der Stromnachfrage auch in der Schweiz führen.

Bis anhin konzentrierten sich die nationalen und internationalen Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet der Informations- und Kommunikationstechnik auf Büro- und Unterhaltselektronikgeräte. Mit dem Projekt **Energieverbrauch von Prozesssteuerungen** [10] sollen erste Grundlagen im bis anhin vernachlässigten Gebiet der speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) geschaffen werden. Dazu werden vorhandene Produkte klassifiziert, verschiedene, typische Fallbeispiele analysiert und gemessen und anhand einer groben Abschätzung des durch diese Geräte verursachten Energieverbrauchs hochgerechnet. Zudem wird untersucht, inwiefern solche Systeme international bereits einer Deklarationspflicht unterliegen und wie eine solche Deklarationspflicht eingeführt werden könnte. Erste Messungen an der Fachhochschule Chur (siehe Fig. 2) zeigen auf, dass der Leistungsbezug von SPS weitgehend unabhängig von der Konfiguration der gesteuerten Prozesse ist. Aussagen zum Stromverbrauch sind also möglich, ohne eine Vielzahl von Prozessen konfigurieren und programmieren zu müssen. Weiter wurde gefunden, dass Netzteile einen wesentlichen Anteil an den Verlusten haben. Ähnlich wie bei den PC werden auch bei SPS die Netzteile meist in einer tiefen Teillast mit entsprechend schlechten Wirkungsgraden betrieben.

ANTRIEBE / ELEKTRISCHE MOTOREN

In der EU besteht ein gemeinsames Klassifizierungsschema mit den Motoren-Klassen eff1, eff2 und eff3. Die Bestrebungen der EU zielen darauf hin, dass Motoren mit der Klassifizierung eff3



Figur 2: Messungen einer SPS am Prozess-Automations-Modell (Quelle: FH Chur)

(schlechte Effizienz) vom Markt verschwinden, der eff2-Motor standardmässig eingesetzt wird und der eff1-Motor zunehmend im Markt vertrieben werden kann. Dazu hat 1997 die EU-Kommission mit der CEMEP (European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics) eine Vereinbarung getroffen, eine kumulative Reduktion des eff3-Typs von 50% bis ins Jahr 2003 im Vergleich zu den 98-er Verkaufszahlen zu erreichen. Ebenfalls soll der Einsatz von Motoren des Standards eff1 und eff2 verstärkt gefördert werden. Das BFE beabsichtigt, aufbauend auf der europäischen Vereinbarung und unter Einbezug der Industrie, die Unterstützung und Verbreitung energieeffizienter Motoren in der Schweiz zu fördern. Deshalb wurde im Projekt **Industrievereinbarung Energieeffizienz von Motoren (eff1, eff2, eff3)** [2] gemeinsam mit der Industrie eine Arbeitsgruppe etabliert, welche die erforderlichen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung schafft. Das Hauptziel ist der Abschluss einer Vereinbarung zwischen dem Bund und der schweizerischen Motorenindustrie.

Im europäischen Projekt **Pilot Actions for the Motor Challenge Programme** (MCP) [11] wurden in den 12 teilnehmenden Ländern Dokumentationen technischer Hilfsmittel zur Effizienzsteigerung bei elektrischen Antrieben zusammengetragen. Die Teilnahmebedingungen für MCP-Partnerschaften wurden nach Bereichen (Antriebe allgemein, Pumpen, Ventilatoren, Druckluft, Management-Politik) in Modulen zusammengefasst und mit fachlichen Hinweisen ergänzt. Für die schweizerische Teilnahme konnten zwei Industriebetriebe mit motorischen Verbrauchsschwerpunkten für die Partnerschaft gewonnen werden. In beiden Betrieben wurde ein Audit (*Grobanalyse*) durch Fachleute des Schweizer *Motor Challenge* Teams durchgeführt,

um die für Effizienzmassnahmen interessantesten Bereiche und entsprechende MCP-Module zu bestimmen. Beide Firmen stellen nun einen Partnerantrag an die EU-Kommission.

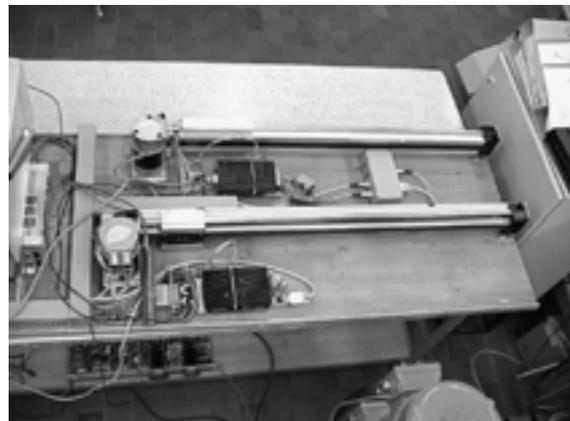
Im MCP wurde auch das bestehende Motoren-Auswertungs-Tool *OPAL* eingesetzt. Dieses wird zudem im separaten Projekt ***OPAL-Erweiterung mit Lüfter- und Pumpensystemen*** [12] funktional ergänzt. Im Berichtsjahr wurden dazu Messungen an Pumpen- und Lüfteranlagen als Voraussetzung zur Bewertung möglicher Energiesparmassnahmen durchgeführt. Zusätzlich wurde die US-amerikanische Software *PSAT* (Pumping System Assessment Tool) evaluiert und eine erste Grundversion der *OPAL*-Erweiterung entwickelt, die es erlaubt, derartige Antriebsanlagen zu erfassen und die Einsparmöglichkeiten bei Motoren zu berechnen.

Im Projekt ***Hocheffizienter getriebeloser Antrieb*** [13] werden Antriebe für Anwendungen mit tiefen Drehzahlen entwickelt. Diese Systeme bestehen aus einem IGBT-Umrichter und einer hochpoligen, permanent erregten Synchronmaschine. Es kann in beiden Drehrichtungen und beiden Energierichtungen arbeiten, so dass es auch als Strom-Generatorsystem verwendet werden kann. Die hohe Effizienz hinsichtlich Wirkungsgrad und Materialeinsatz wird erreicht, weil einerseits auf ein mechanisches Getriebe verzichtet werden kann und andererseits Maschine und Umrichter in vielen Schritten aufeinander abgestimmt und optimiert werden. Dieses Antriebssystem wird für die Leistungsklassen 1,2 MW und 3 kW entwickelt und überprüft. Im Berichtsjahr wurden alle konzeptionellen Arbeiten ausgeführt. Umrichter und Maschine wurden berechnet, simuliert und konstruiert. Die Fertigung der Prototypen (siehe Fig. 3) ist teilweise abgeschlossen, so dass ab Anfang 2003 mit den ersten Tests begonnen werden kann. Die detailliert ausgeführten Berechnungen lassen erwarten, dass die Verluste im Vergleich zu einem konventionellen Antriebssystem mit Getriebe um mehr als 40% reduziert werden können. Der Materialeinsatz kann im Vergleich zu konventionellen Maschinen und Umrichtern um ca. 30% reduziert werden.

Asynchronmotoren im Leistungsbereich unter 1 kW, die im Teillastbereich an einem Steuergerät betrieben werden, arbeiten mit einem schlechten Wirkungsgrad. Im Projekt ***Energiesparmotor*** [14] wurde mit einer neuartigen Technologie auf der Basis eines Permanentmagnet-Rotors abgeklärt, ob sich diese neue Technologie für das Spannungsniveau von 230V eignet, welche Energieeinsparungen sich ergeben und ob die Wirtschaftlichkeit erreicht werden kann. Alle drei



Figur 3: Prototyp des 1'200 kW Umrichters kurz vor der Fertigstellung (Quelle: Technocon AG)



Figur 4: Prototyp des Schrittmotors auf dem Prüfstand (Quelle: LEAG AG)

Themen konnten in der Studie positiv beantwortet werden und eine Fortsetzung der Arbeiten in eine konkrete Applikation ist vorgesehen. Die Energiemessungen erfolgen an der Fachhochschule Luzern (s. Figur auf Titelseite des Programmberichts).

Im Projekt ***Energiesparender Schrittmotorantrieb*** [15] konnte der Nachweis erbracht werden, dass dank einer lageabhängigen, neu entwickelten Bestromung Energieeinsparungen

in der Grössenordnung von 50% erzielt werden können. Mit einer gerechneten Payback-Zeit von etwa 1 Jahr ist auch die Wirtschaftlichkeit gegeben. Die Messungen erfolgten an der Fachhochschule Zürich/Winterthur (siehe Fig. 4).

GERÄTE / DIVERSES

Mit dem Projekt **Wärmepumpentumbler für Mehrfamilienhäuser** [16] sollte einer Technik zur Markteinführung verholfen werden, welche bei ähnlichen Trocknungsleistungen nur noch die halbe Energie konventioneller Tumbler benötigt. Es wurde deshalb eine Prototypenserie von 10 Tumbler produziert. Dass der Hersteller *Miele* für diese Technologie gewonnen werden konnte, war äusserst erfreulich. Es ist davon auszugehen, dass *Miele* die Weiterführung der Arbeiten zur Markteinführung vorantreibt.

Das Ziel des europäischen Programms *GreenLight* besteht in der Verbesserung der Energieeffizienz von Beleuchtungsanlagen in kommerziell genutzten und öffentlichen Gebäuden. *GreenLight* wurde mit zwölf EU-Mitgliedsländern gestartet und will nun in weiteren Staaten sogenannte *National Contact Points* (NCP) aufbauen. Da die Schweiz auch an diesem Programm teilzunehmen gedenkt, werden im Projekt **GreenLight-Aufbau eines Nationalen Contact Points in der Schweiz** [17] die entsprechenden Aufbauarbeiten gestartet. Diese konzentrierten sich vorerst auf die Informierung potentiell interessierter Stellen.

Elektrische Heizbänder sind gewichtige Stromverbraucher: in der Schweiz wird ein jährlicher Verbrauch von ca. 300 GWh vermutet, was der Verbrauchs-Grössenordnung aller Fernsehgeräte entspricht. Mit dem Projekt **Elektrische Heizbänder** [11b] konnte aufgezeigt werden, dass die Umsetzung von energieeffizienten Massnahmen zum rationellen Einsatz der Heizbänder auf verschiedenen Ebenen angesetzt werden muss. Neben dem Publizieren von Fachartikeln für Sanitär- und Elektroinstallateure, ist ergänzend ein einfaches Merkblatt auszuarbeiten und breit zu streuen. Dies wird im Kleinprojekt **Elektrische Heizbänder – Merkblatt für den effizienten Einsatz** [11c] umgesetzt.

In der Schweiz waren Ende der 90er Jahre etwa 16'000 gekühlte Getränke- und Warenautomaten in Betrieb, für welche ein Energieverbrauch von etwa 50 GWh pro Jahr geschätzt wird. Um das vorhandene, substantielle Effizienzpotential umzusetzen, werden im Projekt **Merkblatt zur optimalen Energienutzung bei Kaltgetränken- und gekühlten Warenautomaten** [7d]

Tipps zum Unterhalt und zum Aufstellungsort mit dem Ziel der optimalen Energienutzung zusammengestellt. Als Zielpublikum vorgesehen sind die Betreiber von Automaten und die Vermieter der Standplätze, welche meistens die Stromkosten bezahlen und dafür pauschal entschädigt werden.

In schweizerischen Büros und Warenhäusern wird vermehrt Mineralwasser in Form eines Selbstbedienungsgerätes (Water Cooler, Wasser-Dispenser, siehe Fig. 5) angeboten. Das Wasser wird in Flaschen von 18,9 l (5 Gallonen) gelagert und vor dem Konsum gekühlt. Im Jahr 2001 waren ca. 15'000 Geräte im Einsatz, das Marktwachstum ist hoch. Mit dem Projekt **Energieeffizienzpotential bei Wasserdispensern** [7e] sollen erste Grundlagen über diese im Wachstum stehende Gerätekategorie gewonnen werden. Der Energieverbrauch des ersten ausgemessenen Gerätes beträgt 230% des *Energy Star*-Grenzwerts von 160 Wh/Tag.



Figur 5: Wasserdispenser ohne Verschalung (Quelle: Encontrol GmbH)

Mit dem Projekt **Energieeffizienzpotential bei Heissgetränkeautomaten in der Betriebsverpflegung** [18] wird auf Landesstufe der Energieverbrauch für Heissgetränkeautomaten in der Betriebsverpflegung ermittelt. Weiter werden Effi-

zizienzsteigerungsmassnahmen, deren Kosten und deren Potenziale abgeschätzt. Die Bestimmung der Gerätepopulation und das Benutzerverhalten konnte über eine Umfrage bei den Betreibern der Betriebsverpflegung bestimmt werden. Eine Begleitgruppe mit Vertretern von Betreiber-Firmen und einem grossen Kunden im Dienstleistungssektor ist aufgebaut worden.

Durch den Trend zu Komfortfunktionen (Zustandsanzeige, Zeit-Schaltung, Vernetzung, etc.) dürfte bei Haushaltgeräten der Standby-Verbrauch zunehmen. Zur Abschätzung der energetischen Bedeutung werden im Projekt **Standby-Verbrauch von Haushaltgeräten** [11d] wichtige Haushaltgeräte-Kategorien stichprobenweise gemessen und unter Berücksichtigung von Verbreitung, Marktperspektiven, Gebrauchsmustern, technischem Fortschritt etc. wird der Stand-by-Verbrauch für die Schweiz hochgerechnet. Die Ergebnisse der bisherigen

Arbeiten zeigen, dass heute eingesetzte Netzteile von Haushaltgeräten für Steuerung und Display recht sparsam sind; die typische Leistungsaufnahme beträgt 2 W. Vereinzelt gibt es höhere Werte, v.a. bei «Billig-Geräten». Gerade bei diesen ist aber noch häufig ein Hauptschalter anzutreffen (z.B. Waschmaschine oder Geschirrspüler mit Türkontakt), der während des grössten Teils der Nicht-Nutzungszeit ausgeschaltet bleibt. Auf der anderen Seite stehen Kaffeeautomaten als typische Geräte mit energieintensiver Komfortfunktion (Standby mit Sofortbereitschaft für Kaffeeausgabe), ähnlich wie im Bürobereich die Kopierer. In einer Repräsentativumfrage in der deutschen und französischen Schweiz wurden Besitz und Nutzung von Kaffeeautomaten und Haushalt-Steamern erhoben. Angesichts der Ergebnisse, einer Verbreitung von 64% der Haushalte und des hohen Verbrauchs zur Warmhaltung, könnten Kaffeeautomaten zum Hauptverursacher des Haushalt-Stand-by-Verbrauchs werden.

Nationale Zusammenarbeit

In allen Programm-Schwerpunkten haben im Rahmen der etablierten **Trendwatching-Gruppen**, die sich jeweils aus Vertretern der einschlägigen Industrie, Hochschule und Forschungsstätten zusammensetzen, je eine bis zwei Sitzungen stattgefunden. Diese anerkannte Zusammenkunft von Fachleuten bewährt sich nach wie vor bestens als regelmässig stattfindendes, nationales Informations- und Diskussionsforum.

Das etablierte **Kompetenzzentrum Energie- und Informationstechnik** leistet weiterhin einen wichtigen Beitrag zur nationalen (wie auch internationalen) Zusammenarbeit und gilt als anerkannte Institution in diesem Fachbereich. Leider war es immer noch nicht möglich, die notwendigen Abklärungen und Grundlagen für das vorgesehene **Kompetenzzentrum Druckluft** anzugehen. Dies ist aber ein erklärtes Ziel für 2003.

Im Rahmen eines *National Center of Competence* des **schweizerischen Nationalfonds** beschäftigen sich im Projekt *Materials with Novel Electronic Properties* (MANEP) insgesamt 8 Institute und Industrien mit den Hochtemperatursupraleitern.

Nach wie vor wird die Einbindung von **Fachhochschulen** gefördert. In mehreren BFE-Projekten konnte eine aktive Mitwirkung der Fachhochschulen Chur, Luzern, Zürich/Winterthur, Biel, Brugg und Wallis sowie der Hochschule Zürich erzielt werden.

Durch die gemeinsame Finanzierung von Forschungsprojekten sind bestehende Kontakte zu weiteren **Förderinstitutionen** vertieft worden, 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.

In mehreren Projekten wird ein enger Kontakt mit den schweizerischen **Energieagenturen** [25] gepflegt. So laufen gemeinsame Projekte 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 jeweiligen einschlägigen **Brancheverbände** einzubinden.

Internationale Zusammenarbeit

In allen Schwerpunktsbereichen bestehen gute internationale Kontakte. Diese werden sowohl projektorientiert als auch bei internationalen Konferenzen und Workshops gepflegt.

Neben der schweizerischen Teilnahme am IEA-Programm **Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector** nehmen im Rahmen des **5. EU-Rahmenprogramms** zwei schweizerische Gruppen am Programm **Growth** mit dem Projekt *BIG POWA* (GRD1-1999-10461) teil und bearbeiten für einen Transformator und eine Modellspule bei 77 Kelvin das Problem der AC-Verluste. Das Programm **Superconducting European Network, SCENET II** (GTC1-2001-43047) umfasst dank den neu dazugekommenen osteuropäischen Staaten mehr als 80 verschiedene europäische Gruppen (Nodes) aus Hochschulen und Industrie, die sich alle mit Supraleitung befassen. *SCENET II* hat sich zur Aufgabe gemacht, den Informationsfluss innerhalb Europa zu optimieren, um die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Forschung zu verbessern. Die Schweiz ist mit 2 Nodes vertreten und Mitglied des *SCENET* Steering Committee.

Es zeugt von Anerkennung der schweizerischen Arbeiten auf dem Gebiet der **Informations- und Kommunikationstechnik**, dass der Programmleiter zur Teilnahme am Workshop der Internationalen Energieagentur (IEA) *The Future Impact of Information and Communication Technologies on the Energy System* am 21./22. Februar 2002 in Paris eingeladen wurde. Die Schweiz hat aktiv an

den Projektvorarbeiten eines europäischen SAVE-Projekts zum Thema *Energy Efficiency Assessment for Entertainment, Information and Communication Appliances* mitgearbeitet. Leider wurde dieses Projekt aber auf europäischer Ebene nicht bewilligt. Bezüglich der *Standby-Thematik bei USV-Anlagen* wurde der Kontakt ins internationale IEC-Komitee etabliert, damit dort im Rahmen der anstehenden Revision der entsprechenden Norm die energierelevanten Anforderungen an USV-Anlagen eingebracht werden können. Ferner werden Kontakte mit internationalen Stellen wie z.B. 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.

Im Bereich *Motoren/Antriebe* beteiligt sich die Schweiz am **SAVE Pilotproject for the Motor Challenge Programme** (Contract 4.1031/Z/00-026). Der Programmleiter wurde ins *International Programme Committee 3rd international Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS' 02)* eingeladen [26]. Leider ergab sich keine Gelegenheit, Verhandlungen mit der Europäischen Kommission bezüglich der Motoren-Auslege-Software *OPAL* zur Verschmelzung mit dem europäischen Motoren-Tool *EURODEEM* zu führen. Die Schweiz arbeitete aktiv an einem SAVE-Projektantrag mit dem Titel *Promotion of Energy Efficient Electric Motor Systems* mit, bei dem eine Verschmelzung der beiden Software-Tools vorgesehen war. Der Projektantrag wurde jedoch leider durch die EU zurückgestellt.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

ELEKTRISCHE VERTEILUNG

Das internationale Projekt **Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy sectors using Hydrogen (RES: Reversible Energy Storage System)** [19] hat zum Ziel, im Rahmen eines Pilotprojektes auf Gran Canaria das Zusammenspiel von erneuerbaren Energien in autonomen Netzen zu prüfen und aufgrund einer dezentralen Energieerzeugung mit dem erzeugten Strom eine Wasserstoff-Speicherung auszutesten. Das Projekt ist umsetzungsorientiert und basiert weitgehend auf kommerziell verfügbaren Komponenten. Das Innovative daran ist

das gegenseitige Integrieren der verschiedenen Teilsysteme und deren Zusammenspiel.

ENERGIE UND INFORMATIONSTECHNIK

Im Pilotprojekt **Energieaspekte in der IT-Ausbildung** [20] wurde der mögliche Wissenstransfer von energierelevanten Informationen in die Ausbildung für Informatiklehrlinge untersucht. Das Projekt wurde mit Unterstützung des *Schweizerischen Wirtschaftsverbands der Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik* (SWICO) und der *Energieagentur Elektrogeräte* im Rahmen eines neuen Ausbildungsprogramms

durchgeführt. Dazu wurde je eine Testlektion in den Pilotkantonen Bern und Zürich erarbeitet und durchgeführt. Aus den Testlektionen ergibt sich die Erkenntnis, dass sich der handlungsorientierte und von der Praxis in die Theorie gehende Ansatz bewährt. Es ist ferner sinnvoll, Energieaspekte in kleinen Paketen an bereits bestehende Module anzuhängen und nicht ein separates Modul *Energieaspekte in der Informatikausbildung* vorzusehen. Der Auszubildende ist schliesslich die Schlüsselfigur zum Erfolg, muss deshalb motiviert sein und mit dem notwendigen Hintergrundwissen ausgestattet sein. Es wird vorgeschlagen, ein erweitertes Pilotprojekt zu starten, welches nach wie vor auf die beiden Kantone Zürich und Bern beschränkt ist, im Unterschied zum ersten Projekt aber eine grössere Anzahl Module berücksichtigt.

ANTRIEBE / ELEKTRISCHE MOTOREN

Die Lonza AG ist mit etwa 1% des schweizerischen Stromverbrauchs einer der grössten Stromverbraucher der Schweiz. Etwa 94% des Stromverbrauchs dient dem Antrieb von Elektromotoren. Im Projekt *Einsparpotential an elektr. Energie bei Motoren und Antrieben bei der Lonza* [21a] konnte mit mehreren Diplomarbeiten und vertieften Untersuchungen ein

wirtschaftliches Einsparpotential zwischen 5 und 20% identifiziert werden. Dies wirkte derart motivierend, dass durch die Lonza eine zusätzliche Stelle *Energie-Challenging* geschaffen wurde, die sich ausschliesslich mit der Effizienzsteigerung bestehender und der optimierten Planung neuer Anlagen beschäftigt.

Im Druckluftbereich konnten mit den beiden Projekten *Druckluftoptimierung in einer Schreinerei* [22b] und *Druckluftoptimierung in einer Weberei* [22a] nachgewiesen werden, dass mit einfachen Mitteln durchaus wirtschaftliche Einsparungspotentiale vorhanden sind. Die Einsparungseffekte betragen bei der Weberei rund 75% und bei der Schreinerei etwa 30%.

Bei mehreren Industriebranchen wurden gemäss der gesetzten Ziele branchenspezifische Pilotprojekte unter Einbezug entsprechender Betriebe lanciert. Die gegen Ende 2002 gestarteten Projekte *Einsparung von elektrischer Energie in einem Sägereibetrieb* [23], *Energieeinsparung am Fallbeispiel Christoph Burckhardt AG* [24], *Elektrizitätseffizienz in Kehrrichtwertungsanlagen* [21b] haben als Zielsetzung, mittels Analysen wirtschaftliche Einsparpotentiale zu bestimmen, umzusetzen und damit die Grundlage für einen Multiplikationseffekt zu erzielen.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Im Bereich *elektrische Verteilung* war das negative Abstimmungsergebnis zum EMG prägend. Nach der Ablehnung des EMG befindet sich die Branche in einem Prozess der Neuorientierung. Auch der entsprechende Verband (VSE) ist darin eingeschlossen, weshalb die unterschriftsreife Vereinbarung bezüglich der gemeinsamen Ausbildung vorerst nicht unterzeichnet wurde. Für 2003 ist das BFE nach dem EMG-Entscheid ebenfalls daran, sich neu zu orientieren und die entsprechenden Schlussfolgerungen für das Amt zu ziehen. Das Programm *Elektrizität* wird sich an diesem Prozess beteiligen. Nach wie vor erfordert das zukunftsorientierte Thema der dezentralen Erzeugungsanlagen die Lösung von technisch anspruchsvollen Problemkreisen. Deren Identifikation und Bearbeitung durch gemeinsame Projekte mit der Branche stellen deshalb Zielvorstellungen für 2003 dar.

Im Bereich der *Hochtemperatursupraleitung* konnte gemeinsam mit der Schweizer Industrie ein Projekt über den Strombegrenzer gestartet werden, womit die entsprechende Zielsetzung

erfüllt werden konnte. Auch die Informationsverteilung verläuft zufriedenstellend. Als Zielsetzung für 2003 wird angestrebt, trotz geringen Mitteln eine Kontinuität im Projekt- und Informationsbereich sicherzustellen.

Die angepeilten Aktivitäten im Bereich der **Informations- und Kommunikationstechnik** sowie im Bereich der vernetzten **Haushaltsgeräte** konnten weitgehend umgesetzt werden. Auch die Lancierung erster Grundlagenarbeiten im Bereich der Industrie-Steuerungen konnte erreicht werden. Zudem wurden mit den Aktivitäten im USV-Bereich, im Bereich des Server-Schaltens sowie im Analysieren von IT-Netzgeräten Grundlagen geschaffen, die international Bedeutung und Beachtung erhalten. Im nächsten Jahr sind die internationalen Kooperationen weiter zu intensivieren. Zudem sind weitere Grundlagen für energieeffiziente Standards und/oder Normen zu schaffen sowie identifizierte Erkenntnislücken zu füllen. Schliesslich wird angestrebt, die Erkenntnisse der IT-Ausbildung im Energiebereich in grösserem Umfang umzusetzen.

Im Bereich **Antriebe / elektrische Motoren** wurden in mehreren Branchen Demonstrationsprojekte initialisiert. Leider konnte erneut die Etablierung eines *Kompetenzzentrums Druckluft* nicht angegangen werden; dies wird 2003 weiterverfolgt. Zudem wird geprüft, wie das in Deutschland laufende Programm *Druckluft-effizient* auch in der Schweiz aktiviert werden könnte. Im Falle einer zeitlichen Verzögerung der europäischen Einführung des *Motor Challenge Programms* soll die Kontinuität in der Schweiz sichergestellt werden. Schliesslich sind weitere branchenorientierte Demonstrationsprojekte zu initiieren. Technologisch sind mit den zwei Projekten *Energiesparmotor* und *Energiesparender Schrittmotorenantrieb* **innovative Lösungen**

entwickelt und ausgetestet worden, die substantielle Einsparpotenziale von 75 GWh resp. 64 GWh aufweisen. Es liegt nun an der Industrie, die Ergebnisse zur Produktionsreife zu bringen.

Nachdem bereits im Jahr 2002 verstärkt auf die Umsetzbarkeit gewonnener Forschungserkenntnisse in die Praxis geachtet wurde, soll im Jahr 2003 der Umsetzung an der Schnittstelle von P+D-Projekten und den Massnahmen zur Markteinführung im Rahmen von EnergieSchweiz mehr Gewicht beigemessen werden. Ebenfalls ist vorgesehen, das Programm *Elektrizität 2004 – 2007* nach den Vorgaben des *Konzepts der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007* festzulegen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 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** (JB)
- [2] G. Schnyder, (gilbert.schnyder@sing.ch), SCHNYDER INGENIEURE AG, Hünenberg: **a) Zunahme der dezentralen Energieerzeugungsanlagen in Verteilnetzen** (JB) • **b) Energieeffizienz von USV-Anlagen** (JB) • **c) Industrievereinbarung Energieeffizienz von Motoren (eff1, eff2, eff3)** (JB)
- [3] F. Stalder, M. Büchler, R. Bräunlich, (sgk@sgk.ch), SCHWEIZ. GESELLSCHAFT FÜR KORROSIONSSCHUTZ (SGK), Zürich: **Wechselstromkorrosion an Pipelines** (JB)
- [4] 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)
- [5] M. Lakner, D. Braun, (martin.lakner@ch.abb.com), ABB FORSCHUNGSZENTRUM, Baden-Dättwil: **Marktpotential von supraleitenden Strombegrenzern** (JB)
- [6] B. Aebischer, (bernard.aebischer@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, ETH-Zürich: **a) Betreuung des Kompetenzzentrums Energie und Informationstechnik** (JB) • **b) Energieeffizienz von Computer Netzgeräten** (SB)
- [7] A. Huser, (alois.huser@encontrol.ch), ENCONTROL GMBH, Niederrohrdorf: **a) Stromeinsparpotential durch Schalten von Servern** (SB) ENET 220109 • **b) Ausschreibungsunterlagen im Server, PC- und Netzwerkbereich** (JB) • **c) Energieanalyse FuturLife-Haus** (SB) • **d) Merkblatt zur optimalen Energienutzung bei Kaltgetränke- und gekühlten Warenautomaten** (JB) • **e) Energieeffizienzpotential bei Wasserdispensern** (JB)
- [8] B. Sauter, (beat.sauter@emt.ch), ENERGY MANAGEMENT TEAM AG, Ermatingen: **Energieeffizientes Servermanagement** (JB)
- [9] M. Held, (marcel.held@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Auswirkungen von periodischem Ein- und Ausschalten auf die Server-Hardware-Zuverlässigkeit** (JB)
- [10] E. Bush, (bush@spin.ch), BUSH ENERGIE GMBH, Felsberg: **Energieverbrauch von Prozesssteuerungen** (JB)

- [11] J. Nipkow, (juernnipkow@swissonline.ch), ARENA ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIE-ALTERNATIVEN, Zürich: **a) Schweizer Vertretung im SAVE-Programm: Pilot Actions for the Motor Challenge Programme** (JB) www.motorchallenge.ch • **b) Elektrische Heizbänder** (SB) ENET 220124 • **c) Elektrische Heizbänder – Merkblatt für den effizienten Einsatz** (JB) • **d) Standby-Verbrauch von Haushaltsgeräten** (JB)
- [12] R. Tanner, (tanner@semafor.ch), SEMAFOR INFORMATIK & ENERGIE AG, Basel: **OPAL-Erweiterung mit Lüfter- und Pumpensystemen** (JB)
- [13] R. Niederer, (niederer@technocon.ch), KONSORTIUM TECHNOCON / BARTHOLDI, Zürich: **Hocheffiziente getriebelose Antriebe** (JB)
- [14] M. Lindegger, (markus.lindegger@bluewin.ch), CIRCLE MOTOR AG, Gümligen: **Energiesparmotor** (SB)
- [15] S. Berchten, (bn@leag.com), LEAG ANTRIEBSTECHNIK AG, Schaffhausen: **Energiesparender Schrittmotorentrieb** (SB)
- [16] E. Schwarzwald, THERMODUL CONSULTING, Curio: **Wärmepumpentumbler für Mehrfamilienhäuser** (SB)
- [17] P. Schneiter, (paul.schneiter@energieeffizienz.ch), SCHWEIZ. AGENTUR FÜR ENERGIEEFFIZIENZ, Zürich: **GreenLight NCP – Aufbau eines National Contact Points in der Schweiz** (JB)
- [18] A. Huser, R. Schmitz (alois.huser@encontrol.ch / rolf.schmitz@electrosuisse.ch), KONSORTIUM ENCONTROL/ELECTROSUISSE, Niederrohrdorf: **Energieeffizienzpotential bei Heissgetränkeautomaten in der Betriebsverpflegung** (JB)

Liste der P+D-Projekte

- [19] A. Stoev (a.stoev@idsag.ch), IDS AG, Zürich: **Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy sectors using Hydrogen** (JB)
- [20] B. Aebischer, (bernard.aebischer@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, ETH-Zürich: **Energieaspekte in der IT-Ausbildung** (SB)
- [21] G. Schnyder, (gilbert.schnyder@sing.ch), SCHNYDER INGENIEURE AG, Hünenberg: **a) Einsparpotential an elektr. Energie bei Motoren und Antrieben in der Lonza** (SB) • **b) Elektrizitätseffizienz in Kehrlichtverwertungsanlagen** (JB)
- [22] R. Gloor (gloor@energie.ch), GLOOR ENGINEERING, Sufers: **a) Druckluftoptimierung in einer Weberei** (SB) ENET 220175 • **b) Druckluftoptimierung in einer Schreinerei** (SB) ENET 220174
- [23] I. Wyrsh (iso.wyrsh@wyrstech.ch), WYRSCH TECHNOLOGIE, Küssnacht a. Rigi: **Einsparung von elektrischer Energie in einem Sägereibetrieb** (JB)
- [24] R. Tanner, (tanner@semafor.ch), SEMAFOR INFORMATIK & ENERGIE AG, Basel: **Energieeinsparung am Fallbeispiel Christoph Burckhardt AG** (JB)

Referenzen

- [25] **Homepage von Energieagenturen** www.energieagentur.ch und www.energie-agentur.ch und www.eae-geraete.ch
- [26] R. Brüniger: **Reisebericht: EEMODS'02 26./28. September 2002 in Treviso**, www.electricity-research.ch.
- [27] **Internetseite des Forschungsprogramms** www.electricity-research.ch.

UMGEBUNGSWÄRME, ABWÄRME, WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2002

bis 31. Dez. 2002: Martin Zogg; ab 1. Jan. 2003: Thomas Kopp

martin.zogg@bluewin.ch tkopp@hsr.ch www.waermepumpe.ch



Swiss Retrofit Heat Pump

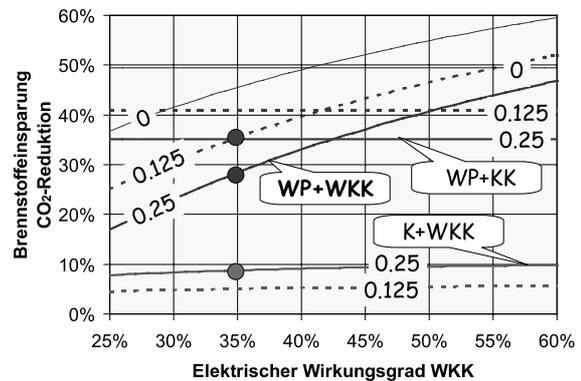
Vom BFE ausgezeichnete Wärmepumpe für den Heizkesslersatz mit integrierter Warmwasserbereitung der Firma *KWT* in Belp für grossen Temperaturhub bei geringem Leistungsabfall und hoher energetischer Effizienz.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Wärme erreicht in der Schweiz einen Anteil von rund 75% der gesamten Nutzenergie. Rund 90% des Bedarfs an Niedertemperaturwärme (Raumheizung, Warmwasserbereitung etc.) werden aus fossilen Brennstoffen gedeckt. Im Bestreben, die Kohlendioxidproduktion wie auch die Schadstoffemissionen zu senken, ist der effizienten und emissionsarmen Erzeugung von Wärme aus flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen deshalb höchste Priorität einzuräumen.

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+KWK) lassen sich gegenüber der noch üblichen Kesselheizung schon mit heute verfügbaren technischen Lösungen **30% bis 50% an Brennstoff einsparen**. Damit wird auch die **CO₂-Produktion entsprechend reduziert**. Wie in [30] ausführlich gezeigt wird, sind Wärmepumpen auch bei der zusätzlichen Erzeugung von elektrischem Strom mit WKK-Anlagen für eine effiziente Nutzung der Brennstoffenergie unentbehrlich. Für die Erzeugung von Wärme und Strom können die Komponenten Kessel (nur Wärme), Wärmepumpe (nur Wärme), WKK-Anlage (Wärme und Strom) und Kombikraftwerk (nur Strom) wie folgt kombiniert werden: Kessel und Kombikraftwerk (K+KK), Kessel und WKK-Anlage (K+WKK), Wärmepumpe und WKK-Anlage (WP+WKK) sowie Wärmepumpe und Kombikraftwerk (WP+KK). Die mit der Kombination WP+WKK erreichbare Reduktion des Brennstoffbedarfs (bzw. der CO₂-Produktion) ist in hohem Mass vom elektrischen Wirkungsgrad der WKK-Anlage abhängig. In Figur 1 werden die Verhältnisse sowohl für die reine Wärmeproduktion (Strom-Wärme-Verhältnis = 0) wie auch für den fiktiven Grenzfall eines vollständigen Ersatzes der schweizerischen Kernkraftwerke durch WKK-Anlagen (Grössenordnung für das Strom-Wärme-Verhältnis während der Heizsaison von 0.25) dargestellt.

Die Figur 1 verdeutlicht das wesentlich bessere Abschneiden der Varianten mit Wärmepumpen.



Figur 1: Brennstoffeinsparungen und CO₂-Reduktion mit den Kombinationen Kessel + WKK-Anlage, Wärmepumpe + WKK-Anlage und Wärmepumpe + Kombikraftwerk gegenüber der Bezugsvariante Kessel + Kombikraftwerk. Kurvenparameter: Strom-Wärme-Verhältnisse 0 (reine Wärmeproduktion), 0.125 und 0.25. Berechnungsannahmen und Berechnungsbeispiele in [30].

Das Hauptgewicht der Forschungsanstrengungen lag deshalb erneut bei der Verbesserung und Erweiterung des Einsatzbereichs der Wärmepumpen. Im Jahr 2002 wurden die folgenden Hauptziele verfolgt:

- **Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt:** Experimentelle Überprüfung der in den letzten Jahren erarbeiteten Grundlagen zur Entwicklung effizienter Wärmepumpen für Temperaturhübe bis 75 K.
- Verbesserung von Wärmepumpen mit **Umgebungsluft als Wärmequelle:** Reduktion der Abtauverluste und der Lärmemission.
- **Optimieren von Wärmepumpenheizungsanlagen:** Optimierte Standardschaltungen, neue Regelungskonzepte sowie neue Testmethoden für kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung.
- **Blockheizkraftwerke:** Wirkungsgradverbesserung für Biogas und Potenzialabschätzung für einen unkonventionellen Stirlingmotor.
- Reduktion des Energiebedarfs **verfahrenstechnischer Prozesse**.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

WÄRMEPUMPEN

Um einen Durchbruch der Wärmepumpe auch als Ersatz bestehender Kesselheizungen zu errei-

chen, wurde das Hauptgewicht der Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen erneut auf **Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt**

(Retrofit-Wärmepumpe) gelegt. Diese müssen als Besonderheit grosse Temperaturunterschiede zwischen der Wärmequelle und den Wärmebezüglern mit geringem Wärmeleistungsabfall, tiefer Kompressoraustrittstemperatur und hoher Effizienz bewältigen. Dem Ziel der Erfüllung dieser hohen Anforderungen waren erneut mehrere Forschungsarbeiten gewidmet [31]. Das im Rahmen einer Ausschreibung zur *Swiss Retrofit Heat Pump (SRHP)* erstplatzierte Funktionsmuster wurde nach einer Verbesserung des Teilsystems zur Wärmeentnahme aus der Umgebungsluft [1] in der Heizsaison 2001/02 als Ölkesslersatz inklusive Warmwasserbereitung einer eingehenden Erprobung unterzogen [2]. Die Gebäude waren typische Altbauten mit Radiatorheizung und Vorlauftemperaturen um 60°C bei einer Aussentemperatur von -12°C. Aufgrund der guten Ergebnisse dieser detaillierten Feldtests zeichnete das BFE den Prototypen der Firma *KWT* in Belp als Gewinner der *SRHP*-Ausschreibung aus. Das BFE würdigte damit die innovative und wegweisende technische Lösung zur Raumheizung bei Vorlauftemperaturen bis 60°C mit Umgebungsluft als Wärmequelle, die thermodynamisch überzeugend integrierte Warmwasserbereitung sowie die vielversprechende neue Abtaumethode. Bei der Bildung einer kombinierten Produktions- und Vertriebsgesellschaft sind noch einige Hürden zu überwinden.

Auf der Basis früherer Forschungsarbeiten wurde eine weitere Variante einer **Retrofit-Wärmepumpe** mit konventioneller Wärmeentnahme aus der Umgebungsluft entwickelt [3], [32]. Auch diese beruht auf einer Economizerschaltung. Sie wurde aber mit einem speziell für das Zwischenansaugen von verdampftem Arbeitsmittel ausgelegten **Prototyp-Scrollkompressoren** ausgerüstet. Damit wurden deutlich höhere Leistungszahlen erreicht. Sie liegen im ganzen Einsatzbereich über den im *SRHP*-Pflichtenheft geforderten Minimalwerten. Für den effizienteren Einsatz von Wärmepumpen im Sanierungsmarkt ist zu hoffen, dass der untersuchte Prototypkompressor eines grossen ausländischen Herstellers bald in Serie produziert und damit auch für die *SRHP* zur Verfügung stehen wird. In einer zweiten Projektetappe wurde als interessante Alternative zur Zwischenansaugung mit Economizerschaltung das Potenzial einer **Boosterschaltung** untersucht. Bei dieser wird bei tiefen Aussentemperaturen und damit hohen Temperaturhuben ein zweiter Verdichter (Hilfsverdichter, Booster) in Serie zugeschaltet. Die Wärmeleistung wird damit um gut 60% erhöht. Dies allerdings bei einer Effizienz einbusse von rund 10%. Für diese interessante Lösung steht leider noch kein für den Wärmepumpeneinsatz geeig-

netter Hilfsverdichter zur Verfügung. Eine thermodynamisch noch bessere Lösung wären echt zweistufige Prozesse. Hier treten aber Probleme mit der Verlagerung des Schmieröls vom Kompressor der zweiten Stufe zum Kompressor der ersten Stufe auf. Nachdem erste Modellrechnungen die beobachtete Tendenz bestätigen, wird das Phänomen der **Schmiermittelwanderung** experimentell untersucht [4]. Personelle Engpässe führten hier leider zu einer Verzögerung. Vollständig zu umgehen ist das Problem der Schmiermittelwanderung bei zweistufigen Wärmepumpen mit ölfrei arbeitenden Kompressoren. Eine Machbarkeitsstudie zeigte für eine neue Generation von **Wärmepumpen mit ölfreien, luftgelagerten Radialkompressoren** ein interessantes Potenzial, insbesondere auch im Sanierungsmarkt. Erste rechnerische Abschätzungen ergaben mit R134a als Arbeitsmittel eine bei hohen Temperaturhuben um rund 25% höhere energetische Effizienz als nach dem *SRHP*-Pflichtenheft gefordert. Dies allerdings mit anspruchsvollen und somit teuren geometrischen Toleranzen von Laufrad, Gehäuse und Lagerung im Mikrometerbereich [5].

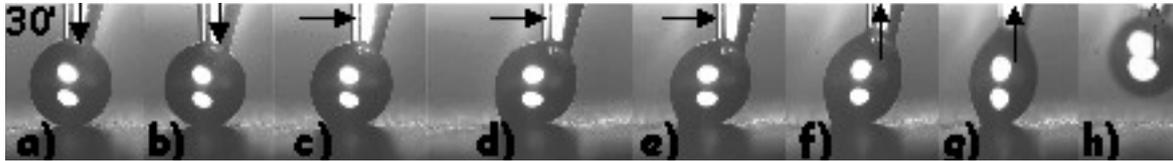
Im Hinblick auf den oft diskutierten Ausstieg aus den Fluorkohlenwasserstoffen ist Ammoniak als hervorragend geeignetes natürliches Arbeitsmittel von besonderem Interesse. Was bei grossen Kälteanlagen und Wärmepumpen längst Stand der Technik ist, fand bisher noch keinen Eingang in die Kleinwärmepumpentechnik. Mit dem in einer früheren Projektphase gebauten Funktionsmuster einer **Kleinwärmepumpe mit Ammoniak** werden nun umfassende Versuche zur Bestimmung der abgegebenen Wärmeleistung, der Leistungszahl, des Gütegrads und der Kompressoraustrittstemperatur durchgeführt. Die bisherigen Versuche [6] mit hohem Temperaturhub ergaben mit einem niedrig verdichtenden Flügelzellenverdichter Leistungszahlen, welche noch deutlich unter den Anforderungen des *SRHP*-Pflichtenhefts liegen. Die Messungen mit einem neuen Flügelzellenverdichter und mit einem Schraubenverdichter können infolge von Lieferungsverzögerungen und technischen Problemen erst im Jahr 2003 durchgeführt werden.

Über die Hälfte der neuen Kleinwärmepumpen mit Wärmeleistungen bis 25 kW nutzt Umgebungsluft als leicht zugängliche, unerschöpfliche Wärmequelle. Bei der Wärmeentnahme aus der Umgebungsluft kommt es aber bei Temperaturen unter etwa 4°C zur Eisbildung an den Wärmeübertrageroberflächen und damit zu einem Abfall der Effizienz. Die vereisten Wärmeübertrageroberflächen müssen deshalb von Zeit zu Zeit wieder abgetaut werden. Der dazu benötigte

Energieaufwand ist mit einer Grössenordnung von 10% des Bedarfs an elektrischer Energie beträchtlich. Die energetischen und wirtschaftlichen Vor- und Nachteile der üblichen **Abtaumethoden** von Wärmepumpen mit Luft als Wärmequelle (Heissgasabtauung und Prozessumkehr) sowie von innovativen Abtaulösungen (Abtauen mit Heizungswasser, Luftabtauung) wurden deshalb in [7] eingehend untersucht. Das Einsparpotenzial ist hier noch beträchtlich. In einem anderen Ansatz wird versucht, die **Eisbildung zu verhindern** [8]. Dazu soll eine hydrophobe Beschichtung der Wärmeübertrageroberfläche deren Benetzung verhindern (Figur 2). Nach erfolgreichen Laborversuchen werden die Beschichtungen im

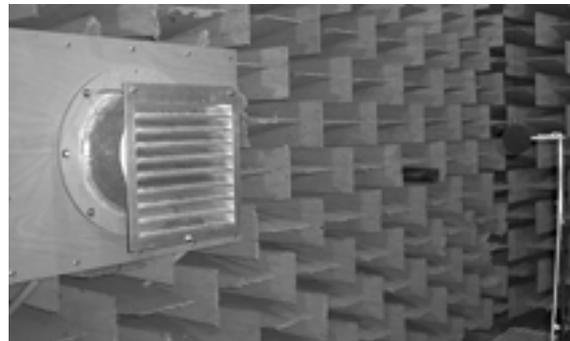
kommenden Jahr auf einen handelsüblichen Lamellenverdampfer aufgebracht und dann unter realen Anström-, Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbedingungen erprobt.

Besonders in dicht besiedelten Gebieten haben Wärmepumpen mit Luft als Wärmequelle vereinzelt zu Beanstandungen der Lärmimmissionen geführt. Deshalb wurden die Lärmquellen von Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen eingehend analysiert (Figur 3). Auf der Grundlage dieser Analyse wurde ein umfassender Leitfaden für Hersteller und Planer zur **lärmmarmen konstruktiven Gestaltung** solcher Anlagen mit zahlreichen konkreten Empfehlungen ausgearbeitet [9].



Figur 2: Wassertropfenbewegung auf einer Aluminiumoberfläche mit basischer Sol-Gel-Beschichtung (aus [8]).

Erdwärmesonden als weitere wichtige Wärmequelle für Wärmepumpen erfordern insbesondere bei grösseren Anlagen eine sorgfältige Auslegung. Das dazu im Auftrag des BFE entwickelte und im BFE-Simulationsprogramm *WPCalc* bereits implementierte **Programmmodul EWS** wurde deshalb überprüft [10]. Es zeigte sich, dass *EWS* mit hoher Rechengeschwindigkeit die Entzugsleistung auch bei tiefen Erdwärmesonden gut wiederzugeben vermag. Anhand von einer tiefen Erdwärmesonde (265 m) wurde aufgezeigt, dass sich im Vergleich zu einem Erdwärmesondenfeld aus mehreren weniger tiefen Erdwärmesonden bei niedrigen Kosten um bis zu 7% höhere Jahresarbeitszahlen ergeben. **Abwasser** ist eine noch wenig genutzte Wärmequelle für Wärmepumpen. Bisherigen Erfolgen stehen auch einige Enttäuschungen gegenüber. Es bestehen noch zwei wesentliche Wissenslücken, nämlich die maximal zulässige Abkühlung und die Ursachen für die Biofilmbildung auf den Oberflächen der Wärmeübertrager. Zunächst wurden in einem neuen Projekt [11] die Auswirkungen der Abwasserabkühlung auf die Wirkung von nachgeschalteten Kläranlagen (ARA) dargelegt und in einem Nomogramm dargestellt. In weiteren Projektetappen werden die zur Biofilmbildung führenden Mechanismen untersucht. Schliesslich sollen Massnahmen zur Bekämpfung der Biofilmbildung vorgeschlagen und in Pilotversuchen überprüft werden.



Figur 3: Messung der Strömungsgeräusche von Wetterschutzgittern in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit (aus [9]).

SYSTEMOPTIMIERUNG

Der zu bewältigende Temperaturhub (Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Heizungskreislauf) ist von grossem Einfluss auf die Effizienz und die Wärmeleistung von Wärmepumpen. Um diesen stets möglichst klein zu halten, erfordern effiziente Wärmepumpenheizungssysteme eine besonders sorgfältige Auslegung, eine eingehende Betriebsoptimierung und eine gute Regelstrategie mit Einbezug der Wechselwirkungen zwischen Gebäude, Wärmeverteilungssystem, Wärmespeichersystem, Wärmepumpe und Wär-

mequelle im Voraus. Aus Kostengründen können **Kleinwärmepumpenanlagen** nicht mit Simulationsprogrammen dimensioniert werden. Deshalb wurden für Kleinwärmepumpenanlagen bis 30 kW Heizleistung für alle praxisrelevanten Anwendungsfälle optimierte **Standardschaltungen** ausgearbeitet [12], [34]. Nach einer Evaluation der häufigsten Schaltungen von Kleinwärmepumpenanlagen mit Heizleistungen bis 25 kW wurden in Zusammenarbeit mit bedeutenden Wärmepumpenanbietern sieben Schaltungen im Hinblick auf gute Praxistauglichkeit, hohe Energieeffizienz und hohe Zuverlässigkeit ausgewählt. Diese wurden mit Computersimulationen detailliert untersucht und optimiert. Das Ergebnis wird als Planungshilfe zur Auswahl der geeigneten Standardschaltung und zur vollständigen Dimensionierung einer Kleinwärmepumpenanlage dargestellt. Die neue Planungshilfe reduziert die bisher verwirrende Zahl von Schaltungen und führt mit einem minimalen Planungsaufwand zu effizienten, kostengünstigen und betriebssicheren Wärmepumpenheizungsanlagen. Es wird erwartet, dass die leicht anwendbare Planungshilfe rasch Eingang in die Praxis finden wird. Kunden von Anlagelieferanten sollten künftig nur noch diese BFE-Standardschaltungen zulassen und die vollständige Auslegung nach den erarbeiteten BFE-Planungshilfen verlangen.

Die Regelung von Wärmepumpen durch **Pulsbreitenmodulation** beruht auf einer laufenden Bestimmung des Wärmebedarfs eines Gebäudes und einer zeitoptimalen Zufuhr dieses Wärmebedarfs durch die Wärmepumpe. Dabei sollen die thermische Trägheit von Gebäude und Wärmeverteilsystem sowie der günstigen Stromtarifzeiten geschickt genutzt werden. In der zweiten Projektphase [13] wurden handelsübliche Regler von zwei Industriepartnern mit den neuen Regelungsalgorithmen programmiert und in einem Sanierungsobjekt erprobt. Die Vorteile der in den letzten Jahren im Rahmen dieses Forschungsprogramms entwickelten Varianten der Pulsbreitenmodulation [35] gegenüber der konventionellen aussentemperaturgeführten Rücklaufregelung werden in der dritten Projektphase mit einem **dynamischen Wärmepumpenprüfstand** experimentell aufgezeigt [14]. Die Messungen erfolgen mit realen Reglern und realen Wärmepumpen. Das zeitlich variable Verhalten des Erdwärmesondenkreislaufs und des Wärmebedarfs unterschiedlicher Gebäudetypen wird am Prüfstand künstlich erzeugt. Momentan laufen die umfangreichen Vorbereitungsarbeiten am Prüfstand.

Wärmepumpen zur Raumheizung sollten auch zur Warmwasserbereitung genutzt werden.

Durch eine geschickte Kombination von Raumheizung und Warmwasserbereitung können beispielsweise die Überhitzung nach dem Kompressor für höhere Warmwassertemperaturen und die Unterkühlung nach dem Kondensator zur Gebrauchwasservorwärmung genutzt werden. Solche Lösungen werden durch die bisherigen Wärmepumpentests nicht honoriert. Deshalb wird in [15] nach einem neuen **Wärmepumpentest für die kombinierte Raumheizung und Warmwasseraufbereitung** gesucht. Ziel des Parallelvorhabens **Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpenanlagen zur kombinierten Raumheizung und Warmwasserbereitung** [16] ist die Entwicklung einer anwenderfreundlichen und transparenten Rechenmethode zur Bestimmung des Jahresnutzungsgrads von kombinierten Heizungs-/Warmwasser-Wärmepumpen. Eine erste auf Summenhäufigkeiten beruhende Methode wurde bereits ausgearbeitet. Dieses Vorhaben dient auch als Vorbereitung für ein internationales Projekt (siehe unten). Zur Umsetzung der Ergebnisse dient eine aktive **Beteiligung in europäischen Normengremien** [17].

BLOCKHEIZKRAFTWERKE

Da bereits ein Überangebot der mit Blockheizkraftwerken produzierten elektrischen Energie gegenüber der von den Wärmepumpen konsumierten besteht, wurde die Weiterentwicklung der konventionellen BHKW-Technik mit Verbrennungsmotoren und fossilen Brennstoffen zurückgestellt. Eine Ausnahme bilden mit Biogas betriebene BHKWs. Ein Liebherr Sechszylinder-**Magermotor** wurde mit einer speziellen Zündvorkammer für den **Betrieb mit Biogas** optimiert [18], [36]. Das Entwicklungsziel eines signifikant höheren elektrischen Wirkungsgrads von 36% bei Einhalten der Emissionsgrenzwerte nach der gültigen LRV ohne Abgasnachbehandlung wurde in Laborversuchen erreicht. Im nächsten Jahr soll der Motor an einer Biogasproduktionsanlage im Dauerbetrieb getestet werden. Anstelle von Verbrennungsmotoren mit innerer Verbrennung werden insbesondere zum Betrieb mit Biogas immer wieder neue Varianten von Stirling-Motoren vorgeschlagen. In diesem Umfeld wurde eine Potenzialstudie für einen **langsam laufenden Stirlingmotor** mit einem über eine Hydraulik unabhängig bewegten Arbeits- und Verdrängerkolben durchgeführt [19]. Das Ergebnis ist wenig ermutigend. Insbesondere das Problem einer wartungsfreien, trocken laufenden Kolbendichtung bei Differenzdrücken von 80 bar scheint mit vertretbarem Aufwand kaum lösbar. An diesem Problem scheiterte bei wesentlich tieferen Diffe-

renzdrücken schon so manches Stirlingkonzept. Eine weitere Realisierungshürde ist die enorme Zylinderkopfbelastung.

VERFAHRENSTECHNISCHE PROZESSE

Mit dem Ziel einer rationelleren Energienutzung in verfahrenstechnischen Prozessen konzentrierten sich unsere Forschungsbemühungen auf die in der chemischen Industrie der Schweiz wichtigen Batch-Prozesse, die Lösungsmittelbewirtschaftung und die energetische Prozessintegration. Energiesparende Massnahmen haben nur dort eine Realisierungschance, wo sie auch Wesentliches bringen. Deshalb wird der **Energiebedarf von Batch-Prozessen** in Mehrprodukt-Produktionsanlagen der Spezialitätenchemie mit umfangreichen Messungen analysiert [20]. Dabei wurde ein verblüffend hoher Energiebedarf für die Raumheizung von 10 bis 25% des Gesamtdampfverbrauchs festgestellt. Bei der elektrischen Energie ergab sich ein produktionsunabhängiger Grundbedarf um 50% des Gesamtbedarfs. Gegenwärtig werden die Anteile einzelner Grundoperationen am Gesamtprozessenergiebedarf ermittelt. Anschliessend soll eine Methode zur Abschätzung des Energiebedarfs von Prozessvarianten entwickelt werden.

Die chemische Industrie verbraucht jährlich allein in Europa etwa 4 Millionen Tonnen (davon ca. 10% in der Schweiz) an **Lösungsmitteln**. Damit ist ein erheblicher Energiebedarf und eine hohe Belastung der Umwelt verbunden. Die Frage, ob es ökologisch sinnvoller ist, Abfalllösungsmittel der chemischen Industrie zu verbrennen oder durch Rektifikation wiederzugewinnen, wurde anhand von fünf Lösungsmittel-Referenzgemischen mit einer detaillierten Ökobilanz untersucht [21]. Das Ergebnis zeigt, dass die **Rektifikation** einer **Verbrennung** vorzuziehen ist, wenn die Herstellung des Lösungsmittels mit einer grossen Umweltbelastung verbunden ist und sich die Komponenten des Lösungsmittelgemischs durch Rektifikation leicht trennen lassen (grosse Dampfdruckunterschiede). Schliesslich wurde das im Auftrag des BFE entwickelte **PC-Programm PinchLENI** zur energetischen Integration kontinuierlicher Prozesse überarbeitet [22]. *PinchLENI* eignet sich sowohl für die Ausbildung als auch für den praktischen Einsatz zur energetisch optimalen Auslegung einfacherer verfahrenstechnischer Prozesse nach der Pinch-Methode. Die aktuelle Version 3.0 kann gratis ab der Internetadresse <http://leniwww.epfl.ch> heruntergeladen werden.

Nationale Zusammenarbeit

Da an den meisten der ohnehin sehr anwendungsnahen Projektarbeiten private Firmen beteiligt sind, ist eine direkte Zusammenarbeit mit der **Privatwirtschaft** selbstverständlich. Sie reicht je nach Anwendungsnähe von einer Beteiligung in entsprechenden Projektbegleitgruppen bis zur Übernahme erheblicher finanzieller Beiträge. Interessierte Kreise werden durch Übersichten des Programmleiters in der Fachpresse und eine laufende Publikation der Forschungsergebnisse in der rege benutzten Internetseite des Programms [40] orientiert. Ein **Workshop an der ETH-Zürich** stellte die Ergebnisse des im Vorjahr abgeschlossenen Vorhabens *Betriebsüberwachung in Wärmepumpen und Kältemaschinen* zur Diskussion. Die Resultate des Vorhabens Standardschaltung [12] wurden im Rahmen eines weiteren **Workshops an der FH Muttenz** mit den interessierten Anbietern von Wärmepumpen besprochen. Sie fliessen bereits in die PENTA-Haustechnikurse des BFE (www.pentaproject.ch) ein. Die in [9] erarbeiteten Massnahmen zur Lärmreduktion bei Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen wurden bereits in **FWS-Kursen** vorgestellt (FWS:

Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz). Studenten von Bau- und Architekturabteilungen an **Fachhochschulen** wurden in die Wärmepumpentechnik eingeführt [37]. Die Resultate dieses Programms fanden auch Eingang in den von EnergieSchweiz geförderten **Kurs Umweltenergie** des SVK (*Schweizerischer Verein für Kältetechnik*). Die zur Tradition gewordene **Jahrestagung an der FH Burgdorf** orientierte diesmal im Rahmen des P+D-Programms über aktuelle Fragen zu grossen Wärmepumpen mit Heizleistungen über 100 kW [38].

Die gute Zusammenarbeit mit dem Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft **PSEL** für eine effizientere Niedertemperaturwärmeerzeugung wurde durch die beiden gemeinsamen Projekte [5] und [10] fortgesetzt. Der **PSEL** unterstützte mit dem BFE, der *Axpo* und dem Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke **VSE** die Qualitätssicherung von Wärmepumpen durch das **Wärmepumpentestzentrum Töss**. Mit dem Energieforschungsfonds der schweizerischen Gasindustrie **FOGA** und dem Forschungsfonds

der schweizerischen Erdölvereinigung **FEV** wurde die Reaktivierung der Weiterentwicklung der Diffusions-Absorptionswärmepumpe koordiniert. Die Aktivitäten des **FOGA**, des **PSEL** wie auch des **FEV** im Bereich der Wärme-Kraft-Kopplung erleichterten uns eine Konzentration der beschränkten Mittel auf die Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnik. In der **FWS** arbeiten das **BFE**, Branchenverbände von Planern und Installateuren, Herstellern und Anbietern von Wärmepumpen, Elektrizitätswerke und Dienststellen von Kantonen zur Verbreitung zuverlässiger, effizienter und preiswerter Wärmepumpenheizungsanlagen

zusammen. Nach dem bewährten **Gütesiegel** für Wärmepumpen hat sich nun auch das Gütesiegel für Erdwärmesonden etabliert. Es konnte bereits an acht Bohrfirmen mit einem Gesamtmarktanteil von 80% vergeben werden. In der Schweiz werden heute gegen 40% aller Neubauten mit Wärmepumpen ausgerüstet. Zu diesem Erfolg haben die gemeinsamen Anstrengungen von **BFE**, **FWS** und **PSEL** wesentlich beigetragen. Die Anliegen der dezentralen Erzeugung elektrischer Energie durch Wärme-Kraft-Kopplung werden durch den **WKK-Fachverband** wahrgenommen.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit erfolgte auch im Jahr 2002 vorwiegend durch **bilaterale Kooperationen** mit Nachbarländern, die Mitwirkung in für die Wärmepumpentechnik wichtigen europäischen Normengremien und durch die Mitarbeit in Projekten der Internationalen Energieagentur IEA. Die **FWS** ist assoziiertes Mitglied der **European Heat Pump Association EHPA** und hat an der Eingabe für das EU-SAVE-Projekt *European Heat-Pump Installer Training Program* aktiv mitgearbeitet. Im Rahmen der schweizerischen Beteiligung am **IEA Heat Pump Programme HPP** hat die Schweiz ans Projekt *Selected Issues on CO₂ as a Working Fluid in Compression Systems* (Annex 27) einen bedeutenden Beitrag [33] geleistet. Im Berichtsjahr konnte durch die Schweiz ein neues IEA-Projekt (Annex 28) zum **Testen von Wärmepumpen zur kombinierten Raumheizung und Warmwasserbereitung** gestartet werden. Im Rahmen der Vorbereitungsarbeiten dazu wurde in der Schweiz ein Expertentreffen durchgeführt. Neben der Schweiz beteiligen sich bisher am neuen Projekt Österreich, Frankreich, Norwegen, die USA und Kanada. Schweden, Deutschland und

Japan werden mit grosser Wahrscheinlichkeit ebenfalls mitwirken. Die Schweiz wird die Leitung des Vorhabens übernehmen. Die siebte **Internationale Wärmepumpenkonzferenz** in Peking war eine ausgezeichnete Gelegenheit, unsere Forschungsanstrengungen [31], [32], [35] und [39] international vorzustellen und zu diskutieren. Auch der im letzten Jahr im Rahmen des Annex 27 entwickelte ölfreie Kleinkolbenkompressor für Kohlendioxid fand grosses internationales Interesse [33]. Nebst diesen IEA-Aktivitäten sichert das **BFE** die Mitgliedschaft der Schweiz an dem für die Forschung und Entwicklung in der Wärmepumpen- und Kältetechnik wichtigen **International Institute of Refrigeration IIR**. Der Besuch der *Delegation des Heat Pump & Thermal Storage Technology Center of Japan* in der Schweiz förderte die Tätigkeiten von schweizerischen Firmen zur Realisierung von Erdwärmesonden als Wärmequelle für Wärmepumpen in **Japan**. Die Internetsite des Forschungsprogramms [40] findet mit über 90% der Zugriffe aus dem Ausland auch international grosse Beachtung.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

bis 31. Dez 2002: Fabrice Rognon fabrice.rognon@bfe.admin.ch

ab 1. Jan 2003: Max Ehrbar: max.ehrbar@ntb.ch

CHALEUR AMBIANTE (POMPES À CHALEUR)

Les priorités définies dans le concept se révèlent judicieuses: il reste beaucoup de chemin à parcourir dans le segment des grosses pompes à

chaleur, plus particulièrement dans la rénovation. Des efforts de démonstration restent nécessaires. Ainsi, une seule demande a été déposée et acceptée. De nombreux contacts assortis de lettres

d'intention sont restés lettres mortes et 3 projets approuvés en 2000 et 2001 ont été annulés: dans deux cas, le chauffage sera au mazout et le dernier ne se construira pas du tout. Par conséquent, 40% du budget 2002 n'a pas pu être utilisé. Les 29 projets en cours se répartissent en 21 installations et 8 mandats (voir Tableau 1).

Air	3
Sondes géothermiques	4
Nappe phréatique	4
Eaux de surface (rivière, lac, source)	2
Eau de STEP (usée ou épurée)	5
Chauffage à distance	3
Total	21

Tableau 1: Répartition des projets en cours par sources de chaleur

Soulignons l'originalité des projets **Centrale termica per produzione di acqua calda e fredda Grünenfelder Magadino/TI** [23] et **PAC sur sondes géothermiques pour chauffage et refroidissement du bâtiment Seematter à Vevey/VD** [24] qui combinent dans la même installation la production de chaleur et de froid. La planification de telles installations est désormais facilitée par le manuel élaboré dans le programme de recherche. Le potentiel d'application – particulièrement dans l'hôtellerie et la restauration – est important.

Le projet **Fernkälte mit Absorptions-WP aus Kehrichtwärme Hauptbahnhof SBB Bern** [25], qui utilise des machines à absorption pour la production de chaud et/ou de froid, a été mis en service avec succès dans les délais prévus. Grâce à l'excellente gestion du projet **Kälte- und Wärmeerzeugung für Eissporthalle St Jakob/BL** [26], le premier match de hockey a pu se dérouler sur une excellente glace à la date prévue. L'originalité de l'installation réside dans l'utilisation double de l'un des deux compresseurs: il produit soit du froid lors de la production de glace, soit du chaud (eau chaude sanitaire) lors du maintien de la glace. Les rejets de chaleur et donc la consommation d'électricité sont ainsi réduites.

Les rapports suivants sont disponibles auprès d'ENET:

- **Suivi de la pompe à chaleur à absorption de l'école des Acacias à Neuchâtel** [27]
- **suivi de la pompe à chaleur sur stock en terre et de la cogénération du centre**

d'entretien des autoroutes à Domdidier/FR [28]

- **Gasmotor-Wärmepumpe auf Flusswasser in Hinterkappelen (BE): langfristige Erfolgskontrolle** [29]

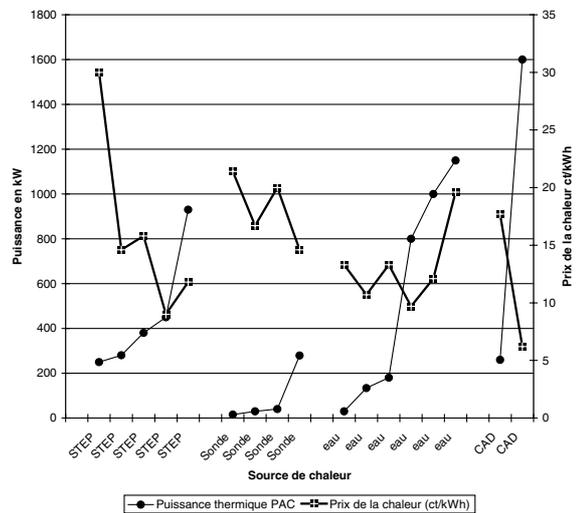


Figure 4: Répartition des projets en cours par puissance thermique de la pompe à chaleur et prix de revient de la chaleur. Attention: ces chiffres concernent uniquement des installations de démonstration. Les projets pilotes ont été exclus pour cette considération.

Le **prix de la chaleur** (voir Figure 4) tient compte l'aide financière octroyée qui l'abaisse de 2 ct/kWh environ. De manière générale, les prix de revient baissent avec l'augmentation de la puissance. Le phénomène est net pour les sources de chaleur eau des stations d'épuration des eaux (STEP) et moins marqué pour les sondes géothermiques. Notons que certains projets se meuvent dans des zones de prix de revient de chaleur concurrentielles.

Les spectres de puissance couverts par les différentes sources de chaleur dans la pratique se confirment: les eaux de STEP à partir de 200 kW, les sondes géothermiques jusqu'à 500 kW et les eaux de surface de 50 kW à plus d'un MW. Tous les projets soutenus à ce jour – en cours ou achevés – utilisent annuellement 66 GWh d'énergie de l'environnement et permettent l'économie de 6'200 tonnes de mazout par an.

Les mandats s'orientent selon deux axes principaux: (1.) suivi à long termes d'installations choisies en fonction de leur potentiel de multiplication et (2.) validation sur le terrain de résultats et d'optimisations dans le cadre du projet d'analyse

in situ d'installations de pompes à chaleur (ANIS ou FAWA en allemand). Ce dernier poste a été fortement augmenté en 2002 afin d'accompagner et de compléter le projet schémas standards (voir [12]). Dès 2003, il reprendra une taille plus modeste avant de se conclure en 2004.

À l'avenir, les priorités restent la rénovation de chauffages existants, l'utilisation de fluides frigorigènes neutres pour l'environnement, l'amélioration du coefficient de performance et l'abaissement des coûts, surtout pour les installations de moyenne puissance.

COUPLAGE CHALEUR-FORCE (SANS PILES À COMBUSTIBLE)

Durant l'année écoulée, nous n'avons reçu aucune demande pour des projets. Certes, plusieurs contacts se sont produits, mais pour répéter des expériences passées sans les améliorer (petite cogénération avec moteurs à gaz, Stirling, petite turbines). Ces projets n'atteignaient largement pas le rendement électrique minimal de 33% fixé dans le concept et le programme (pour des combustibles non renouvelables). Nous constatons que la recherche et donc la démonstration dans ces domaines sont fortement réduites depuis quelques années. Les incertitudes liées à l'ouverture probable du marché de l'électricité n'y sont pas étrangères. Par conséquent, seuls 3 projets sont en cours dont un mandat de suivi:

WKK mit Klärgas und Dampfmotor in der ARA Buholz/LU: L'aspect le plus intéressant ne réside pas dans les techniques utilisées mais dans la constellation producteur de biogaz – production de chaleur – vente de chaleur à des tiers. L'installation a été mise en service avec succès.

Production d'électricité par cycle de Rankine à Châtillon/GE: Il s'agit d'une machine à cycle de Rankine couplée aux moteurs à biogaz (méthanisation) du site de Nant près de Genève. En cas de succès, il sera possible de produire de l'électricité soit à partir de rejets de chaleur à relativement basse température, soit de combiner le module à une des CCF à moteurs (CCF à cycle combiné de faible puissance, mais avec un rendement électrique augmenté de 5 à 10%). Ce projet concrétise sur le terrain les efforts de recherche effectués ces dernières années à l'EPFL sur les cycles de Rankine et les pompes à chaleur bi-étagées. La fabrication est assurée par une entreprise de technique du froid de Suisse romande. Le projet est entré en phase d'exploitation et a connu ses premiers problèmes. Les essais se poursuivent de manière encourageante.

Suivi du CCF de l'ORT à Anières/GE: Ce mandat consiste en l'analyse d'une CCF au diesel, plus particulièrement des problèmes liés au comportement à charge partielle. Le rapport intermédiaire a été remis.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Die im Konzept 2000/2003 für das Jahr 2002 anvisierten Ziele konnten im Wesentlichen erreicht werden. Die gemeinsam mit Hochschulen und privaten Firmen bearbeiteten Forschungsarbeiten wiesen den Weg zu einer **neuen Generation von Wärmepumpen** für den Sanierungsmarkt [1], [2], [3], [5], [6], [31], [32]. Sie brachten bei der **Optimierung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen** auch beachtliche Fortschritte auf dem Weg zur einer einfachen und doch effizienten und zuverlässigen Auslegung von Kleinwärmepumpenanlagen bis 30 kW [12] und zu einer optimaleren Regelung von Wärmepumpenheizungssystemen [13], [14]. Wichtige Grundlagen konnten für eine **verbesserte Nutzung von Umgebungsluft** [1], [7], [8], [9] und von Erdwärmesonden [10] als Wärmequellen erarbeitet werden. Die im Bereich **verfahrenstechnischer Prozesse** gemeinsam mit der chemischen Industrie durchgeführten Arbeiten lieferten wertvolle

Erkenntnisse zur Reduktion des Energiebedarfs komplexer chemischer Prozesse [20], [21].

Bei der Umsetzung der im Rahmen des Forschungsprogramms entwickelten **neuen Wärmepumpengeneration** für den Sanierungsmarkt *SRHP* konnte die gemeinsame Produktion durch schweizerische Hersteller leider noch nicht realisiert werden. Auch in einer vielversprechenden Weiterentwicklung einer erdgasbetriebenen Diffusionsabsorptionswärmepumpe gab es Rückschläge. Wir hoffen im Jahr **2003** in beiden Fällen weiterzukommen. Weiter sollen Entscheidungsgrundlagen für weitere Aktivitäten bei Wärmepumpen mit Ammoniak als Kältemittel [6] und Oberflächenbeschichtungen für die Vermeidung der Verdampfervereisung [8] vorliegen. Die Vorarbeiten zum **Wärmepumpentest für kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung** [15], [16] dienen als gute Basis für eine zielge-

richtete Leitung des im Jahr 2003 startenden internationalen Projekts im Rahmen der IEA (IEA HPP Annex 28). Aufbauend auf den Standardschaltungen für Kleinanlagen [12] sollen auch für grössere Wärmepumpenanlagen **Standardschaltungen** ausgesucht und optimiert werden. Bei den restlichen Vorhaben stehen Abschluss und Umsetzung im Vordergrund. **Neu** sind Projekte zur Verbesserung der Teilsysteme zur Nutzung von Umgebungsluft als Wärmequelle, zu Erdwärmesonden mit Kohlendioxid als Wärmeträger, zum optimalen Wärmeträgervolumenstrom in Erdwärmesonden und zur Entwicklung einer neuen Diffusionsabsorptions-Wärmepumpe geplant. Im Bereich der verfahrenstechnischen Prozesse sind die bisherigen Untersuchungen zur Lösungsmittelbewirtschaftung zu verallgemeinern.

Les **objectifs pour les projets P+D, chaleur ambiante** ont été partiellement atteints: le projet SRHP a passé avec succès la phase de test *in situ*

(voir [2]) de deux installations, mais nous attendons une phase plus conséquente de démonstration. Dans les plus grandes puissances, plusieurs distributeurs d'énergie rencontrent du succès avec leurs offres de *contracting* énergétique. Afin d'éviter des concentrations géographiques qui affaibliraient l'effet de démonstration, nous avons dû en tenir compte dans nos activités. Cela explique en partie le faible nombre de nouveaux projets dans cette catégorie. Nous poursuivons nos efforts en coordination avec le domaine des infrastructures de SuisseEnergie et le *groupe promotionnel suisse des pompes à chaleur* (GSP). Relevons que des activités importantes dans le domaine **chaleur-force** ont glissé vers le programme *Combustion*. Cependant les objectifs fixés n'ont pas été atteints: il reste beaucoup à développer et à démontrer dans la petite cogénération à rendement électrique et global élevé et à faibles valeurs d'émissions polluantes.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(ZB) Zwischenbericht vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

Alle Berichte können von www.waermepumpe.ch/fe heruntergeladen werden.

- [1] Th. Kopp (thomas.kopp@hsr.ch), M. Deller, M. Studer, FH Rapperswil & KWT Kälte-Wärme-Technik, Belp & EMPA, Dübendorf: **Wärmequelle Luft für Retrofitwärmepumpen** (SB) ENET 220137
- [2] H. R. Gabathuler (gabathuler.ag@bluewin.ch), H. Mayer, Gabathuler AG, Diessenhofen & KWT Kälte-Wärme-Technik, Belp & FH Burgdorf: **Messungen an Retrofit-Wärmepumpen, Phase 2** (SB) ENET 220143
- [3] S. Guex, M. Zehnder, D. Favrat (daniel.favrat@epfl.ch), Laboratoire d'énergétique industrielle, EPF Lausanne & Electricité de France, Moret-sur-Loing & SATAG THERMOTECNIK, Arbon: **Pompe à chaleur air-eau à haute température, phase 2** (SB) ENET 220219
- [4] M. Zehnder, D. Favrat (daniel.favrat@epfl.ch), Laboratoire d'énergétique industrielle, EPF Lausanne: **Migration d'huile dans les pompes à chaleur** (JB) ENET 220227
- [5] 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
- [6] E. Geisser, Th. Kopp (thomas.kopp@hsr.ch), FH Rapperswil & UNEX AG, Zürich & KAPAG AG, Zumikon & Ecopac AG, Herrliberg: **Kleinwärmepumpe mit Ammoniak, Phase 3: Bau eines Funktionsmusters** (JB) ENET 220221
- [7] 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
- [8] P. Hoffmann (patrik.hoffmann@epfl.ch), Institut d'Optique Appliquée, EPFL Lausanne: **Méthodes de traitement de surface pour obtenir une diminution du givrage** (JB) ENET 220222
- [9] H.R. Graf (hansrudolf.graf@sulzer.com), Sulzer Innotec, Winterthur: **Lärmreduktion bei Luft/Wasser- Wärmepumpenanlagen - Grundlagen und Massnahmen** (SB) ENET 220193

- [10] S. Signorelli, Th. Kohl (kohl@geo.phys.ethz.ch), Institut für Geophysik, ETHZ Zürich: **Validieren des Programms EWS und Optimieren der Erdwärmesondenlänge**, (SB) ENET 220186
- [11] O. Wanner (wanner@eawag.ch), V. Panagiotidis, H. Siegrist, EAWAG, Dübendorf: **Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen** (JB) ENET 220226
- [12] H.R. Gabathuler, H. Mayer (gabathuler.ag@bluewin.ch), Gabathuler AG, Diessenhofen & Th. Afjei, FH Muttenz: **a) 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: **b) 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: **c) Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen, Teil 2: Grundlagen und Computersimulationen** (SB) ENET 220218
- [13] 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
- [14] E. Shafai (shafai@imrt.mavt.ethz.ch), Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH Zürich & Gabathuler AG, Diessenhofen: **Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase 3: Vergleich der PBM-Regler auf dem dynamischen Prüfstand** (JB) ENET 210231
- [15] A. Montani (andre.montani@axpo.ch), Wärmepumpentestzentrum Töss, Winterthur: **Wärmepumpentest für kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung** (JB) ENET 220223
- [16] Th. Afjei (t.afjei@fhbb.ch), C. Wemhöner, FH Muttenz: **Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpenanlagen mit Warmwasserbereitung** (JB) ENET 220232
- [17] 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 220225
- [18] A. Roubaud, D. Favrat (daniel.favrat@epfl.ch), Laboratoire d'énergétique industrielle, EPF Lausanne: **BiogasMotor** (SB) ENET 220203
- [19] P. von Böckh (p.vonboeckh@fhbb.ch), FH Muttenz & H.P. Zumsteg, Ch. Gaegauf, Ökozentrum, Langenbruck: **Potenzialabschätzung eines langsam laufenden Stirlingmotors** (SB) ENET 220138
- [20] P. S. Bieler (pbsieler@tech.chem.ethz.ch), Laboratorium für technische Chemie, ETH Zürich: **Analyse und Modellierung des Energiebedarfs in Batch-Prozessen** (ZB) ENET 220185
- [21] Th.B. Hofstetter (hungerb@tech.chem.ethz.ch), Laboratorium für technische Chemie, ETH Zürich: **Abfalllösungsmittelmanagement in der chemischen Industrie – Ökologischer Vergleich von Rektifikation und Verbrennung** (SB) ENET 220141
- [22] F. Maréchal, D. Favrat (daniel.favrat@epfl.ch), Laboratoire d'énergétique industrielle, EPF Lausanne: **Utilisation rationnelle de l'énergie dans l'industrie par PinchLENI** (SB) ENET 220229

Liste des projets P+D (dont un rapport est paru en 2002)

- [23] G. Grünenfelder (gino@gruenenfelder.biz), Grünenfelder SA, Quartino: **Centrale termica per produzione di acqua calda e fredda Grünenfelder Magadino/TI** (SB)
- [24] B. Rochat (seematter@com.mcnet.ch) R. Seematter SA, St-Légier: **PAC sur sondes géothermiques pour chauffage et refroidissement du bâtiment Seematter à Vevey/VD** (SB)
- [25] H.P. Ludwig (hanspeter.ludwig@bern.ch) GWB Gas-, Wasser- und Fernwärmeversorgung der Stadt Bern, Bern: **Fernkälte mit Absorptions-WP aus Kehrlichwärme Hauptbahnhof SBB Bern** (SB)

- [26] P. Furrer (peter.furrer@iwb.ch) Industrielle Werke Basel, Basel: **Kälte- und Wärmeerzeugung für Eissporthalle St Jakob/BL** (SB)
- [27] Dr. B. Matthey (info@masai-conseils.com) Matthey B. Ingénieurs-Conseils SA, Montezillon: **Suivi de la pompe à chaleur à absorption de l'école des Acacias à Neuchâtel** (SB) ENET 18104
- [28] J. Audergon (jacques.audergon@geimesa.ch) Geimesa et Partenaires SA, Fribourg: **Suivi de la pompe à chaleur sur stock en terre et de la cogénération du centre d'entretien des autoroutes à Dombidier/FR** (SB) ENET 19277
- [29] F. Hämman Ing.-Büro f. Haustechnik F. Hämman, Hinterkappelen: **Gasmotor-Wärmepumpe auf Flusswasser in Hinterkappelen (BE): langfristige Erfolgskontrolle** (SB) ENET 29145

Referenzen

- [30] M. Zogg: **Wärme und Strom aus Brennstoffen – effizient und umweltschonend**, Gas-Wasser-Abwasser gwa 82(2002)12, 907/912; Download ab [40].
- [31] M. Zogg: **The Swiss Retrofit Heat Pump Program**, Preprints, 7th International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, 19-22 May 2002, China Academy of Building Research, Vol. 1, pp. 208/218; Download ab [40].
- [32] M. Zehnder, D. Favrat, H. Hohl, C. Olivier, M. Perevozchikov: **High Performance Air-Water-Heat Pump with Extended Application Range for Residential Heating**, 7th International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, 19-22 May 2002, Vol. 2, pp.146/157.
- [33] H. Baumann, M. Conzett: **Small Oilfree Piston Type Compressor for CO₂**, Proceedings of the 2002 International Compressor Engineering Conference, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- [34] Th. Afjei: **Standardlösungen für Kleinwärmepumpenanlagen**, Kälte & Klimatechnik (2002)9, 62/64,66/68.
- [35] E. Shafai, R. Wimmer, H. P. Geering: **A New Control Approach for Heat Pump Heating Systems**, Preprints, 7th International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, 19-22 May 2002, Vol.1, pp. 146/157.
- [36] A. Roubaud, R. Röthlisberger, D. Favrat: **Unscavenged Combustion Prechamer as a Way to Improve Efficiency and Emissions of a Lean-Burn Cogeneration Biogas Engine: Comparison with Natural Gas**, International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Berlin, Germany, 3-5 July, 2002.
- [37] M. Zogg: **Einführung in die Wärmepumpentechnik**; Ausbildungsmodul der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie; Download ab [40].
- [38] F. Rognon (Hrsg.): **Wärmepumpen: Wo sind die Grossen?**, Tagungsband zur 9.UAW-Tagung vom 11.Juni 2002, Bundesamt für Energie 2002, Download ab [40].
- [39] Th.Afjei: **Heat Pump Heating Systems for Low-Energy Houses in Switzerland - Field Measurements and Technical Handbook**, Proceedings of the 7th International Energy Agency Conference on Heat Pumping Technologies, Beijing, China, May 19-22, 2002, Vol. 2, China Academy of Building Research, pp. 827/839.
- [40] **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.

BRENNSTOFFZELLEN

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2002

Alphons Hintermann; Otto Haas

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



Testfahrt des Brennstoffzellen/Supercap-Elektromobils über den Simplonpass

Das Fahrzeug ist das Ergebnis einer Zusammenarbeit von PSI, ETH-Zürich, ETH-Lausanne, FH-Biel, Montena SA Fribourg, VW Werke Wolfsburg und FEV Motorentechnik Aachen

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Aussichten auf einen hohen Wirkungsgrad sowie der umweltschonende Energieumwandlungs-Prozess der Brennstoffzellen-Technologie sind die Motivation für ein **eigenständiges Brennstoffzellen Programm**. Das Programm soll in der Schweiz Kompetenzen fördern und vernetzen zur Beurteilung, Erforschung, Weiterentwicklung und Umsetzung der Brennstoffzellen-Technologie. Innovation und international anerkannte Qualität auf allen Technologiestufen soll dabei der Massstab sein.

Für **verschiedene Brennstoffzellentypen** (Membran-, Phosphorsäure-, Hochtemperatur- sowie Direkt-Methanol-Brennstoffzellen), hat sich in der Schweiz in den letzten Jahren eine beachtliche Kompetenz auf verschiedenen Ebenen – von den Grundlagen bis hin zum kurz bevorstehenden Markteintritt – etabliert. Schwerpunktmässig gefördert werden hingegen nur die Polymer-Elektrolyt-Membran- (PEM-) sowie die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC):

Das Paul Scherrer Institut (PSI) ist seit vielen Jahren auf dem Gebiet der **Wasserstoff/Methanol-Brennstoffzellen Technologie** tätig. Die am PSI entwickelte Technologie ist die Basis im PEM-Programmteil und ist in vielfältiger Weise im Einsatz: Boote (FH Yverdon), Rollstühle (FH Grenchen) u.a. Als Resultat einer fruchtbaren Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Forschungsinstituten und der Industrie wurde im Berichtsjahr diese Technologie in einem Antriebsstrang zusammen mit Superkondensatoren in einem Personewagen erfolgreich eingesetzt und getestet. Die PSI-Technologie wurde in den letzten Jahren zusammen mit der ETH Zürich punkto Fertigungstechnik und Verbilligung der Produktionskosten weiterentwickelt und steht nun vor einem Tech-

nologietransfer an die Fachhochschule Biel, wo weitere Projekte mit neuen Industriepartnern durchgeführt werden sollen. Gesucht wird immer noch ein Industriepartner, der in die PSI/ETH-Technologie investiert und den industriellen *Lead* übernehmen will.

Die SOFC-Forschung wird schwerpunktmässig an der ETH Zürich, der ETH Lausanne und der EMPA betrieben. **Erdgas-SOFC** wurden in den letzten Jahren bei *Sulzer HEXIS* mit grossem Einsatz bis zur Produktionsreife entwickelt. Dabei wurde mit der Fabrikation eines Wärmekraft-Moduls mit einer elektrischen Leistung von 1kW und einer thermischen Leistung je nach Bedarf bis zu ca. 25 kW eine Pionierleistung vollbracht. Die Fachhochschule Winterthur hat mit ihren Simulationsaktivitäten dazu einen wichtigen Beitrag geleistet. Um die *Sulzer HEXIS*-Technologie herum haben sich verschiedene Projekte mit verbesserten SOFC-Technologien angesiedelt, die teilweise abgeschlossen oder kurz vor dem Abschluss sind, jedoch nur geringe Chancen haben, in den nächsten Jahren zur Marktreife zu gelangen.

Generelle Ziele für beide Technologien sind:

- Kontinuität und Know-how in Forschung und Entwicklung sichern und vertiefen
- enge Zusammenarbeit und Vernetzung von Forschern von Hoch- und Fachhochschulen mit Industriepartnern
- Prüfen der Markttauglichkeit, Ausloten von Schwachstellen und Umsetzen der gewonnenen Erkenntnisse in praxistauglichen Brennstoffzellensystemen
- Beiträge zur Analyse von Produktionsprozessen und deren Optimierung sowie zur Verringerung der Produktionskosten

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

WASSERSTOFF UND METHANOL PEM-BRENNSTOFFZELLEN

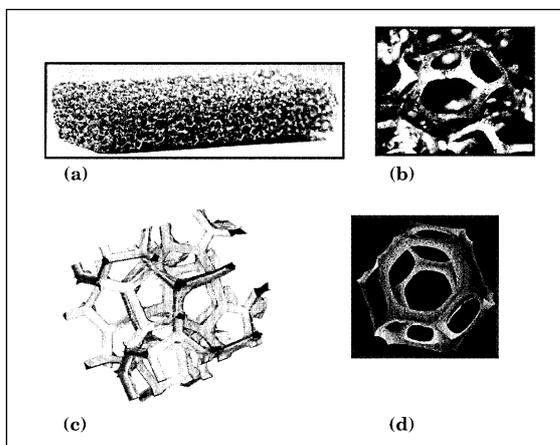
Bei den Forschungsarbeiten für Wasserstoffbrennstoffzellen und Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (DMBZ) stehen die Steigerung des Wirkungsgrades bei hohen Leistungen und die Entwicklung kostengünstigerer Komponenten für diese Technologien im Vordergrund.

Neben der Optimierung des Elektroden- und Bipolarplatten-Engineerings für die Brennstoff-

Luft- und Feuchtigkeitszufuhr wurden im Projekt **Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H₂ oder Methanol als Brennstoff** [1] auch Forschungsarbeiten zur Entwicklung von in-situ Diagnosemethoden und von billigeren und wirkungsvolleren Katalysatoren durchgeführt. Ein weiteres Thema ist die Herstellung von strahlengepfropften Membranen mit optimaler Ionenleitfähigkeit und minimaler Brennstoffdurchlässigkeit. Ein wichtiges Ergebnis dieser Forschungsarbeiten ist die Demonstration der Temperaturbeständigkeit

strahlengepflanzter Membranen basierend auf 25 μm dicken FEP-Filmen. In H_2/O_2 -Brennstoffzellen konnten bei einer Zelltemperatur von 80°C die Stabilität und Lebensdauer solcher Membranen auf ca. 5000 Stunden ausgedehnt werden. In neuen Versuchen werden bei dieser Temperatur die Langzeitbeständigkeit unter dynamischen Bedingungen ausgelotet. Hinsichtlich Katalysatorentwicklung konnte leider die hoffnungsvollen Resultate der PtCo/C-Elektrokatalysatoren des Vorjahrs [25] in Brennstoffzellenversuchen nicht umgesetzt werden. Dank der langjährigen Erfahrungen in mikrostrukturierten Elektroden in Kontakt zum Festelektrolyten konnten hingegen weitere kinetische Parameter, z.B. der Ladungsdurchtrittswiderstand, durch Impedanzspektroskopie [26] ermittelt werden. Mittels der Neutronenradiographieanlage NEUTRA wurden am PSI auch erste Messungen zur Visualisierung des Massenflusses auf der Anodenseite der DMZ erfolgreich durchgeführt.

An der EPFL sind Programme zur Simulation des dynamischen Verhaltens von Brennstoffzellen-Systemen im Projekt **Control System Oriented Dynamic Modeling of FC Systems** [2] in Bearbeitung. Projektziel ist die Analyse und Modellieren des charakteristischen dynamischen Verhaltens eines Brennstoffzellensystems. Bei diesen Modellierungsarbeiten wurden vor allem hinsichtlich der Modellierung der Teilsysteme Fortschritte erzielt. Mit Experimenten am Teststand konnten für diese Simulationen die charakteristischen Zeitkonstanten für einzelne Teilsysteme bestimmt werden. Es wurde auch der Innenwiderstand der einzelnen Zellen eines 300W Stapels – der jedoch Unstabilitäten aufwies – bei verschiedenen Operationsbedingungen gemessen. Für das Jahr 2003 sind Messungen an einem Stapel mit stabilerem Verhalten geplant.



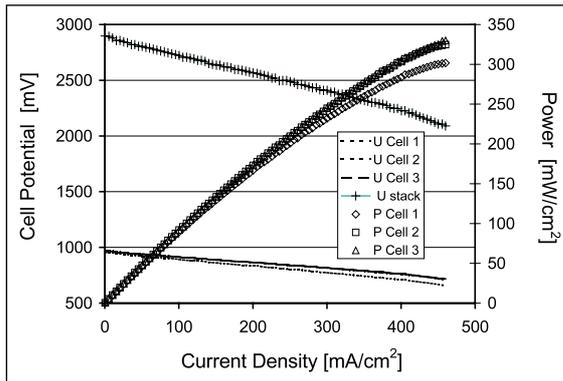
Figur 1: Beispiele poröser Materialien, ein potenzieller Ersatz für traditionelle Kanalstrukturen in Brennstoffzellen.

Direkt Methanol Brennstoffzellen (DMFC) sind vielversprechende künftige Energiewandler mit vielseitigem Anwendungspotenzial [27]. Leider lässt der Wirkungsgrad und die Leistungsdichte dieser Zellen noch zu wünschen übrig. Es bestehen Kenntnislücken im Verständnis der in der DMFC ablaufenden komplizierten elektrochemischen Reaktionsmechanismen. Ziel des Projekts **Computational Modeling of Electrochemical Transport Phenomena in Direct Methanol Fuel Cells (DMFC)** [3] ist es, zur Überwindung dieser Defizite, den Einsatz neuartiger Materialien, z.B. poröse Schäume, vorzuschlagen.

ERDGAZ SOFC-BRENNSTOFFZELLEN

In den letzten Jahren wurden mehrere Projekte zum Thema anodengestützte SOFC durchgeführt. Dieses neue Zellenkonzept verspricht einen Betrieb bei tieferen Temperaturen und dadurch höhere Stabilität der Zellen hinsichtlich Temperaturzyklen (die Zellen leiden im Allgemeinen, wenn sie von der Umgebungstemperatur auf die Betriebstemperatur von rund 800° C gebracht werden) und Redoxzyklen (beim Abschalten der Zellen ändert sich das Redoxpotential an der Anode drastisch, die reduzierenden Eigenschaften des Brennstoffs weichen den oxidierenden Eigenschaften der Luft).

Unter der Leitung der EMPA wurde in Zusammenarbeit mit der ETH-Zürich, ETH-Lausanne und Sulzer Innotec das Projekt **Anode supported PEN for SOFC** [4] abgeschlossen. Schwerpunkt waren neue Verfahren für die Herstellung von billigen, anodengestützten Membranen mit Festelektrolyten. Mit verschiedenen Verfahren wurden sehr dünne Membranschichten (~5 μm) auf die tragende Anode aufgebracht und in kleinen Hexis-Stacks (Elektroden Durchmesser 120 mm) getestet. Die beachtlich guten Leistungskurven eines 3-Zellen- Stapels sind in Fig. 2 reproduziert. Eine Kostenabschätzung zeigt, dass der kostenbestimmende Faktor bei genügender Stückzahl durch die Materialkosten des Anodensubstrats bestimmt ist und nicht durch den Fabrikationsprozess. Die Machbarkeit des neuen Konzepts (gepresste Anoden) konnte eindrücklich demonstriert werden. Zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Zelleneigenschaften müssen allerdings die Fabrikationsparameter noch weiter optimiert werden. Da noch vielfältige Optimierungsarbeiten anstehen und sich zur Zeit kein Industriepartner daran beteiligen möchte, bestehen nur geringe Chancen, dass diese Herstellungsverfahren schon in naher Zukunft einen Einsatz in einem marktfähigen Produkt findet.

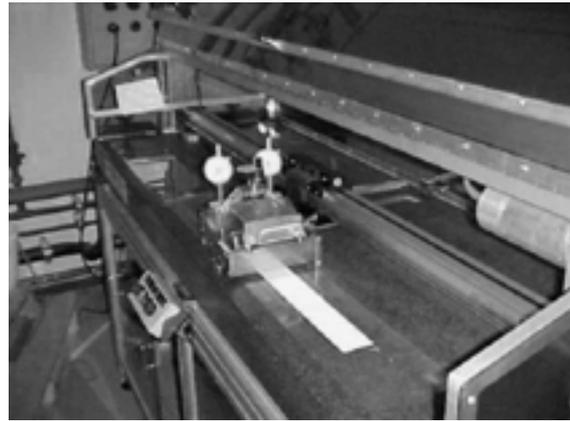


Figur 2: Resultate des 3-Zellenstapels mit anodengestützten Membranen. Leistungsdichte (P) und Zellspannung (U) der Einzelzellen und des Stapels in Funktion der Stromdichte

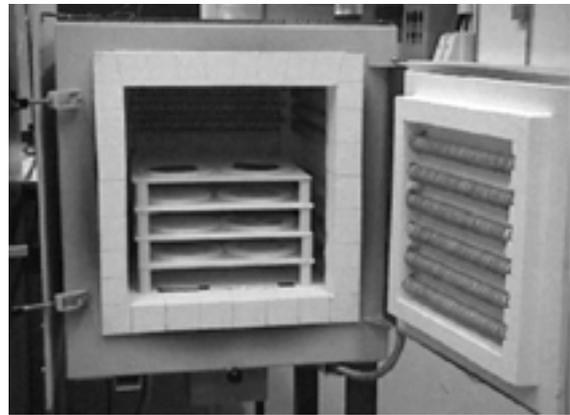
Auch die Firma *HTceramix SA* arbeitet an anodengestützten Membranen. Erste Versuche im Rahmen eines KTI-Projekts [22] haben sich als vielversprechend erwiesen und werden im BFE-Projekt **Anode Supported SOFC with Thermal Cycling and Redox Stability** [5] weitergeführt. Die Redoxstabilität und Temperaturzyklenstabilität der Zellen konnten mit anodengestützten Membranen wesentlich verbessert werden. Mit einer optimierten Mischung von Zirkonoxid und Nickeloxid mit geeigneter Porengrösse konnten die bei diesen Membranen oft auftretenden Risse, beim Zyklen der Redoxbedingungen weitgehend behoben werden. Wobei allerdings am Rand der Elektroden immer noch kleine Mikrorisse entstehen und für praktische Anwendungen die elektrische Leitfähigkeit der Elektroden noch etwas verbessert werden muss. Die Leistungsdichte ist wegen dem etwas zu grossen Innenwiderstand etwa zweimal kleiner als in konventionellen Zellen, welche bei *Sulzer Hexis* eingesetzt werden.

Bei der Firma *HTceramix SA* wurde ein kostengünstiges Bandherstellverfahren zur Fabrikation von SOFC-Zellmembranen entwickelt. Das Projekt **Bandherstellverfahren ASE-SOFC für Brennstoffzellen** [6] wurde im März abgeschlossen. Aus dem Schlussbericht geht hervor, dass beim Test der Membranen in Brennstoffzellen innerhalb der einzelnen Zellen die Homogenität der Elektroden genügend gut ist, die Abweichungen der Stromdichte von Zelle zu Zelle aber trotzdem hohe Unterschiede aufweisen. Auch die erreichbare Stromdichte ist noch nicht überwältigend, sie könnte aber für viele Anwendungen, wo der Preis der Zellen im Vordergrund steht, genügen.

An der *ETH-Lausanne* wird im Projekt **Transient Response and Degradation Behaviour in Novel SOFC Short Stacks** [7] das dynamische



Figur 3: Nasschemische Pilot-Zell-Produktionslinie



Figur 4: Brennofen für SOFC-Zell-Elemente

Verhalten und das Langzeitverhalten von SOFC-Stapeln modelliert. Es konnten bereits Temperaturprofile in den Zellen als Funktion der Elektrodengrösse, der Anzahl Zellen usw. berechnet werden. Für diese Simulationen mussten einige Parameter auch experimentell bestimmt werden. So wurden z. B. die thermischen und elektrischen Kontaktwiderstände, von *Interconnect Materials*, welche zum Kontaktieren der einzelnen Zellen innerhalb des Stapels verwendet werden, gemessen. Für das Langzeitverhalten wird der Einfluss oxidierender Bedingungen (Luft bei 800° C) auf diese Grössen untersucht. Ausserdem wird in einem nächsten Schritt das stationäre und dynamische Verhalten von ganzen SOFC-Systemen modelliert. Ziel des Vorhabens ist unter anderem, aus Experimenten mit einzelnen Zellen das Verhalten von ganzen Stapeln zu prognostizieren und das System als Ganzes optimieren zu können.

Nationale Zusammenarbeit

Die Schweizer SOFC-Technologie ist nahe am Markt und entsprechend haben KTI-Projekte [22,23] gute Chancen. Im Projekt **Ausbau SOFC-Simulationstool** [23] arbeitet die HTA-Winterthur sehr eng und erfolgreich mit *Sulzer Hexis* zusammen. Die Winterthurer Studienabgänger haben auch grosse Chancen, eine Stelle zu finden. Im Hinblick auf einen künftigen Technologietransfer der PSI-ETHZ-PEM-Zellentechnologie in die Privatwirtschaft dürfte sich der von der KTI geförderte dynamische Teststand [24] an der HTA-Biel als nützlich erweisen.

Projektweise wird für beide Brennstoffzellentechnologien eine aktive Zusammenarbeit der Hoch- und Fachhochschulen, der EMPA und Industriepartnern angestrebt. In gemeinsamen Forschungs-Projekten oder über Pilot- und Demonstrationsprojekte sollen schweizerische Brennstoffzellen im System getestet und verbessert werden. So wurde die anfänglich am PSI entwickelte PEM-Technologie in den letzten zwei Jahren zusammen mit der ETH-Zürich im *PowerPac*-Projekt mit dem erklärten Ziel weiterentwickelt, möglichst viele Industriepartner an der neuen Technologie teilhaben zu lassen. Mittelfristig soll ein Netzwerk

von Forschern, potentiellen Anwendern und Produzenten entlang der gesamten Technologie-Wertschöpfungskette aufgebaut werden. Dasselbe Ziel hat der Anwendungsbereich PEM-Zellen in Elektrobooten (PSI, FH-Yverdon und Biel und der Firma *MW-Line*).

Ausserdem stehen in der Region Basel seit 1997 drei stationäre Brennstoffzellenanlagen in Nahwärmeverbundnetzen – ohne grosse Störungen und unvorhergesehenen Überraschungen – erfolgreich im Einsatz. Beispielsweise weist die Brennstoffzelle (ONSI PC 25C) der *Alternativ-Energie Birsfelden AG* vor allem bezüglich Energieeffizienz und Umweltbelastung Vorteile auf: So beträgt der elektrische Wirkungsgrad über 40% und bleibt nahezu konstant bis auf eine Teillast von 50%. Die Schadstoffemissionen liegen ca. 10 mal tiefer als bei einem mit Katalysator ausgerüsteten Gasmotor-Generator System. Hingegen ist die Anlage im Vergleich zum Gasmotor-Generator System markant teurer. Die dabei gesammelten Erfahrungen sind wichtig und stellen wertvolle Entscheidungsgrundlagen für künftige Einsätze von Brennstoffzellenanlagen dar.

Internationale Zusammenarbeit

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 XII (1999-2003) und XIII: **Solid Oxide Fuel Cells** mit.

Ziel des anwendungsorientierten Annex XII **Stationäre Brennstoffzellen Demonstration und Markteinführung** [19] ist die Demonstration von Brennstoffzellen und die Eruiierung deren Marktchancen. Zwischenergebnisse dieses Gremiums sind: Der Einsatz von Kleinbrennstoffzellen (1 – 10 kW_{el}) für die Hausenergieversorgung wird mit Schwerpunkten in den USA und Deutschland getestet. Das Marktpotential wird als gross beschrieben, der Markteintritt heute jedoch etwas weniger euphorisch beurteilt als in den vergangenen Jahren. Der Einsatz der Brennstoffzelle in der Hausenergieversorgung wird ein grosser Einfluss auf die Strom- und Gasversorgungssysteme haben. Die möglichen Auswirkungen auf diese Verteilernetze sind Gegenstand weiterer Abklä-

rungen. Verfügbare stationäre Brennstoffzellen beschränken sich nach wie vor auf Kleinanlagen (1 – 10 kW_{el}) mit PEM-FC und SOFC sowie mittlere Anlagen (200 – 300 kW_{el}) mit *phosphoric acid*-Brennstoffzellen (PAFC), PEM-FC, molton carbonate-Brennstoffzellen (MCFC) und SOFC.

Innerhalb des technologieorientierten Task XIII **SOFC Brennstoffzellen und EU Informationsaustausch** [20] werden verschiedene Seminare durchgeführt und jungen Forschern die Gelegenheit gegeben, Labors innerhalb der EU zu besuchen. Im Jahr 2002 haben zwei Postdoktoranden an der EPFL Erfahrungen auf dem Gebiet der SOFC-Brennstoffzellentechnologie sammeln können. Protonenleitende keramische Membranen sind im Zusammenhang mit SOFC vielversprechende, aber noch wenig untersucht Materialien. Ein Postdoktorand hat Arbeiten mit protonenleitenden Ceroxiden durchgeführt. Die Resultate konnten bereits im wissenschaftlichen Programm eines *Risoe Meetings* (Dänemark) und im *Solid Oxide Fuel Cell Forum* (Luzern) vorgestellt werden.

An der internationalen **Konferenz FUEL CELL 2002** im Juli 2002 in Luzern trafen sich 590 Brennstoffzellen-Fachleute aus 35 Ländern. Damit hat sich diese jährlich von U. Bossel in Luzern organisierte Konferenz zu einem wichtigen Anlass in der internationalen Brennstoffzellenszene entwickelt.

Zwei national organisierte und mit internationaler Beteiligung durchgeführte **Tagungen** waren: der PSI-FZJ-ICL-workshop *Modelling in PEFC*, Villigen-PSI, im Juni 2002 und das internationale SAGT-

Symposium, *Brennstoffzellen im Automobil*, Wil, im Sept. 2002.

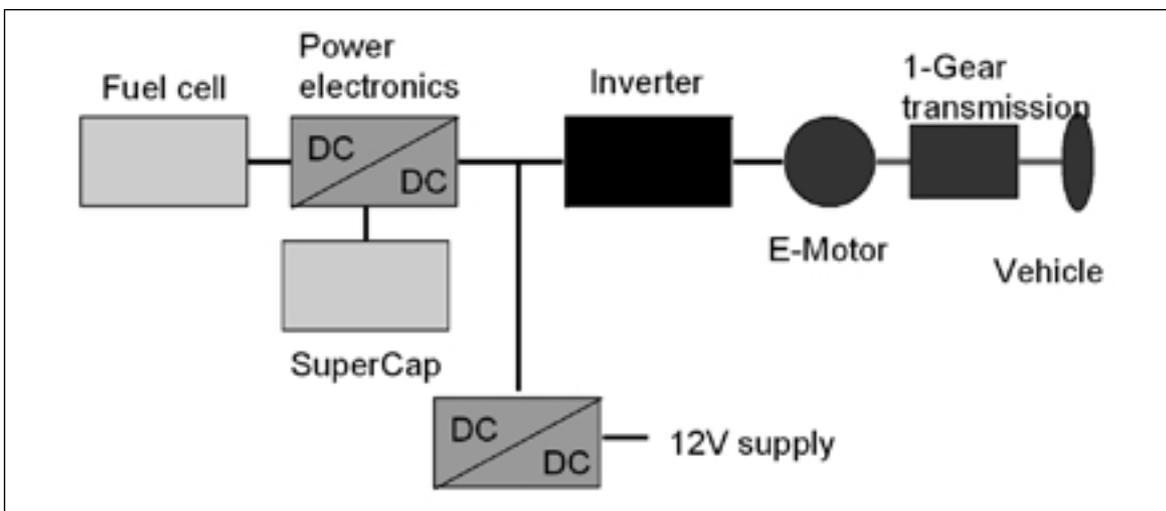
Auch bei den P+D-Projekten bestehen internationale Kontakte. Beispielsweise wurde das Projekt *BRESA* [8] in einem Netzwerk von Partnern und Unterlieferanten in enger Zusammenarbeit mit den Haupt-Industriepartner *Volkswagen AG* erfolgreich abgeschlossen. Neue, international vernetzte Folgeprojekte sind in der Vorbereitungsphase.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die Arbeiten für das *BRESA*-Projekt **Personenwagen mit Brennstoffzellen- und Supercap-Antrieb** [8] konnten 2002 termingerecht abgeschlossen werden. In einem Volkswagen BORA wurde ein Antriebsstrang realisiert bestehend aus 6 Brennstoffzellen-Stapeln mit je 8 kW elektrischer Leistung, einem elektrischen Zwischenspeicher, ausgestattet mit 282 Supercap-Zellen, die gesamthaft 360 Wh Elektrizität speichern können, einem DC/DC-Konverter und einem 75 kW-Elektromotor (siehe Fig. 5). Der Antriebsstrang wird über ein Energiemanagement geregelt, das die geforderte Leistung optimal auf die Brennstoffzelle und den Supercap verteilt. Dieses Brennstoffzellensystem erreicht über einen weiten Bereich des Betriebs einen Wirkungsgrad von über 40%. Die Kernelemente des Konzepts sind die Anwendung einer neuen Technik bei der Herstellung der Bipolarplatten für die Brennstoffzellen, der neue Systemaufbau der Brennstoffzellen

und die Erhöhung der Energiedichte der Supercaps. Der Verbrauch im europäischen Testzyklus von 5-6 Litern Benzinäquivalent ist für dieses ca. 2000 kg schwere Fahrzeug beachtlich.

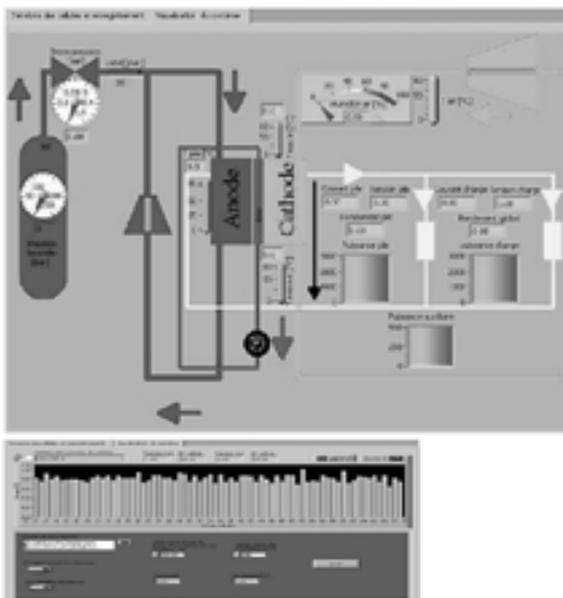
Die publikumswirksamste Projektdemonstration fand im Januar 2002 statt (siehe Titelbild des Berichts). Der mit Brennstoffzellen und Supercap ausgerüstete VW BORA überquerte an diesem Tag den Simplonpass. Mit diesem Härtetest wurde eindrücklich demonstriert, dass der im ETH-Bereich (PSI, ETH Lausanne und ETH Zürich) entwickelte Antriebsstrang den Erwartungen entspricht. Die personelle und finanzielle Beanspruchung aller Partner war enorm, umso erfreulicher war der erfolgreiche Abschluss des Projekts. Das Fahrzeug wurde im Betrieb auf insgesamt mehr als 1000 km ausführlich getestet und am Automobilsalon in Genf (unterstützt von der *AMAG Schweiz AG* und *Volkswagen*) sowie am *Earth-*



Figur 5: Schema des im ETH-Bereich unter der Federführung des PSI entwickelten, neuartigen Antriebskonzepts für das Brennstoffzellen/Supercap-Fahrzeug

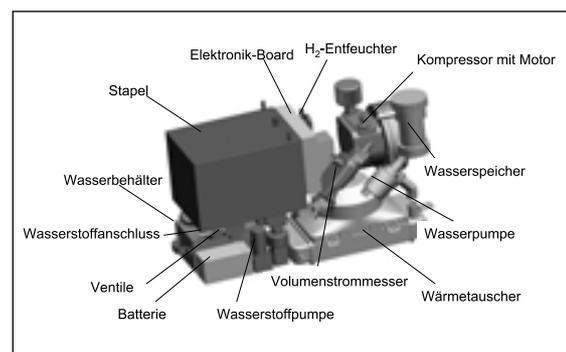
Summit in Johannesburg einem grösseren Publikum vorgestellt. Das Fahrzeug ist allerdings noch weit von einem serienmässig herzustellenden Automobil entfernt.

Am Institut Energie et Systèmes Electriques (IESE) der Ecole d'ingénieurs du canton de Vaud (EIVD) wurden kleinere Brennstoffzellen, welche in Zusammenarbeit mit dem PSI und der Fachhochschule Biel gebaut wurden, in verschiedenen praktischen Einsätzen getestet und an mehreren Veranstaltungen vorgeführt. Die Brennstoffzellen-Aktivitäten des IESE sind im Internet vorbildlich illustriert (<http://ies.eivd.ch/Projects/Hydroxy/hydroxy.html>). Die Arbeiten sind in der Lehre gut verankert und helfen Schwachstellen und mögliche neue Anwendungen der Brennstoffzellentechnik auszuloten. Im Rahmen dieser Arbeiten konnte auch der gewünschte Know-how Transfer zwischen den beteiligten Instituten effizient durchgeführt werden. Besonders erwähnenswert ist der Einsatz einer 300 W PEM-Brennstoffzelle als Hilfsaggregat bei einer Atlantik Überseglung und im *Solar Boat Cup 2002* in Mailand. Die Mannschaft und das Boot hat bei dieser Gelegenheit den *Prix d'innovation technologique* erhalten. Im Projekt **Pile PEM pour Hydroxy 2000** [9] wurde an der Fachhochschule Biel mit dem Konzept des PSI ein 3kW Brennstoffzellenstapel für den Einsatz im Boot *Hydroxy 2000* gebaut und an der EIVD im Rahmen einer Diplomarbeit [28] getestet. Dazu musste zuerst ein entsprechender Prüfstand aufgebaut werden. Das EIVD entwickelt im Projekt **Integration des Système pour Hydroxy 2000** [10] die für *Hydroxy2000* notwendige Steuerung und Systemintegration.



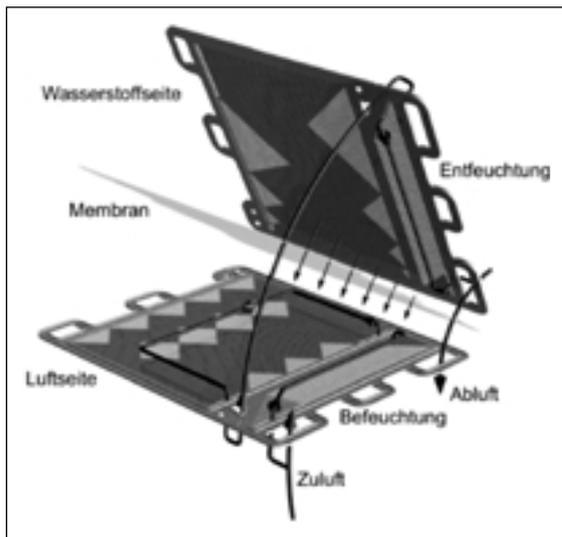
Figur 6: Simulation des BZ-Stapels von Hydroxy2000

Das Ziel des Projekts **Entwicklung eines mobilen 1 kW BZ-Systems (PowerPac)** [11] ist die Entwicklung eines kostengünstigen, portablen 1 kW-PEM-Brennstoffzellensystems, das als mobile Stromversorgung vielfältig einsetzbar ist. Eine neue Stapelgeneration mit integrierter Prozessluftbefeuchtung, neuem Dichtungskonzept und neuen Stromsammlern wurde entwickelt. Parallel dazu wurde auch das ganze System für Brennstoff, Prozessluft und Kühlmittel sowie die Regelung und Bedienung, den Anforderungen einer tragbaren Anwendung entsprechend neu konzipiert (Fig. 7). Neuartig ist die Integration der Befeuchtung in die Zelle (Fig. 8), indem die Zuluft durch die Abluft befeuchtet wird: Die Zuluft wird zuerst über den Befeuchtungsteil geführt, bevor sie auf die aktive Fläche gelangt. Die feuchte, mit dem Reaktionswasser beladene, verbrauchte Luft gelangt auf die andere Seite der Membran und wird über diese Entfeuchtungsfläche aus der Zelle geführt.



Figur 7: PowerPac mit allen seinen Komponenten im CAD

Die neue Stapelgeometrie befindet sich im Test, die Funktion von Befeuchtung, Dichtung und Stromabnehmern konnte an Einzelzellen und Kurzstapeln demonstriert werden. Die Regelung wurde ebenfalls mit einem Kurzstapel entwickelt und getestet. Die Auslegung zu einem tragbaren System wurde mit CAD vorgenommen. Das Projekt wurde im Rahmen des *Swiss Technology Award* ausgezeichnet und kann deshalb an der *Hannover Messe 2003* präsentiert werden. Es hat auch den 2. Preis des *REACH Umweltpreis 2002* erhalten und konnte deshalb an der Messe *REACH for process solutions* im Oktober 2002 in Basel ausgestellt werden. Als kritischer Punkt wurde kurz vor Projektende die Dichtung der Bipolarplatten identifiziert. Eine optimale Lösung konnte im Zusatzprojekt **Analyse der Dichtung PowerPac** [12] gefunden werden.



Figur 8: Design der Bipolarplatte mit zelleninterner Befeuchtung

Mit dem Elektrofahrzeug SAM der Bieler Firma Cree (Figur 9) kann eine neue Nutzungsmöglichkeit von Brennstoffzellen erschlossen werden. Im Projekt **Brennstoffzellenfahrzeug SAM, Phase I** [13] wird an der HTA-Biel eine PEM-Brennstoffzelle gebaut, deren Gesamtintegration (inkl. Steuerung) in den SAM für das Jahr 2003 vorgesehen ist. Ende 2002 wurden mehrere Varianten des Stack-Designs (*BRESA-Design*, *PowerPac-Design* und ein angepasstes *PowerPac-Design*) geprüft.



Figur 9: Prototyp des SAM der Firma CREE

Die Ziele im Projekt **Lully Hexis Biogas** [14] waren: (1) Betreuung der im Jahr 2001 gewählten und installierten online-Gasanalyseanlage auf dem Lully-Gelände und Kopplung an das *Sulzer HEXIS* SOFC-System und (2) Analyse von Biogasen verschiedenen Ursprungs auf Mikroverunreinigungen wie Ammoniak, Chlorverbindungen, Siliciumverbindungen usw. Die online-Gasanalyse-Anlage (Mikro-Gaschromatograph) des Lully-Biogases wurde installiert, laufend betreut

(Feb - Nov 2002) und an das *HEXIS* SOFC-System gekoppelt. Im Durchschnitt lag ein Gas vor mit 56% CH_4 , 41% CO_2 und 100 ppm H_2S (im Extremfall bis auf 700 ppm). Weitere vier Biogase wurden genauer analysiert. ARA-Gas erweist sich als geeignet für eine SOFC-Speisung (stabil 65% CH_4 , < 2 ppm H_2S). Eine breite Reihe von flüchtigen Kohlenwasserstoffe sind zwar in den Biogasen enthalten (GC-MS Detektion: Benzol, Toluol, Xylole, Terpene, Olefine, Dimethylacetamid, etc.), vermutlich aber nur in Kleinstkonzentrationen. Ausser bei der Si-Bestimmung wurden die Ziele des Analysenteils des Projektes erreicht. Eine separate, nasschemische Bestimmungsmethode für den Ammoniakgehalt in Biogas konnte identifiziert werden. Ende Januar 2003 werden noch die Analysenwerte von Cl, F, S und NH_3 in den erwähnten Biogasen nachgeliefert und der Schlussbericht anschliessend fertiggestellt.

Im Projekt SOFC-APU **Advanced Fuel Cell Stack (AFCS)** [15] untersucht *Sulzer Innotec* ob Hochtemperaturbrennstoffzellen auch als Hilfsenergiequellen, sogenannte *Auxiliary Power Units* (APU) in Personenwagen eingesetzt werden können. Ziele dieser Machbarkeitsstudie waren die Auslegung, das Design und der Nachweis der Herstellbarkeit eines SOFC-Brennstoffzellenstapels mit 5 kW Leistung, der sich an den Anforderungen für eine Anwendung als APU- oder CHP-Anlage derselben Leistung zu messen hat. Die Integration und der Betrieb eines SOFC-Systems als APU in Personenwagen stellen sehr hohe Anforderungen an Materialien und Herstellverfahren. Die kritischen Grössen sind das erlaubte Gewicht und das zur Verfügung stehende Volumen. Als generelle Spezifikationen sind von der Automobil-Industrie für ein 5 kW_{el} APU-System eine Masse von weniger als 50 kg bei einem Volumen von bis zu 50 Liter verlangt. Das Stapelelement sollte eine hohe Leistungsdichte bei möglichst geringem Volumen und Gewicht aufweisen und im Bereich von 600° bis max. 800° C mit reformierten Brennstoffen betrieben werden können.

Die wohl wichtigste Entwicklung im Projekt **100W_{el} SOFCONNEX based Stack Demonstration** [16] ist die Integration des Stromkollektors in die Gaskanäle, wodurch die metallischen Verbindungen in einem Metallblatt zusammengefasst werden können. Um die verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien zu kompensieren wurde eine keramische Zwischenschicht verwendet, die durch zweckmässige Strukturierung genügend flexibel ist (SOFCONNEX™ Konzept). Als Zwischenresultat der angestrebten 100 W_{el} Zelle konnte ein Stapel mit drei und einer mit vier Zellen demonstriert

werden (Leistung 30 W_{el} resp. 40 W_{el}, Leistungsdichte 0.2 W/cm²). Obwohl die Qualität der Zellen noch nicht befriedigend ist, zeigen die Resultate, dass das angestrebte Ziel (100 W_{el}) erreicht werden kann.

Ziel der Arbeiten im Projekt **Dynamic SOFC System Model Using gPROMS** [17] ist die Simulation der stationären und dynamischen Prozesse von Einzelzellen und die Extrapolation experimenteller Resultate auf ganze Brennstoffzellenstapel. Im vergangenen Jahr wurde die Basis des Simulationsmodells definiert und für die *gPROMS* Simulationssoftware formuliert. In einem zweiten Schritt wurde die Simulation einzelner Zellen mit experimentellen Resultaten verglichen. Das Modell muss nun noch erweitert werden damit z. B. auch der Einfluss von Temperaturschwankungen auf die Reaktionskinetik berücksichtigt wird und

der Brennstoff- und Reformereinfluss studiert werden kann.

Mit dem Ende 2002 gestarteten Projekt **OneBat Start** [18] wird vorerst nur abgeklärt, ob SOFC auch in kleinen, tragbaren elektronischen Geräten als Stromquelle einsetzbar sind. Da bei den Hochtemperaturbrennstoffzellen energiedichte Brennstoffe wie Butan oder Propan benutzt werden können, wäre es im Prinzip möglich, mit solchen Stromquellen die Energiedichte von wiederaufladbaren Batterien zu übertreffen. Dabei ist natürlich die hohe Betriebstemperatur der SOFC ein Handicap das zuerst überwunden werden muss. Unter der Leitung von *Sulzer Innotec* wurde eine Gruppe von Experten zusammengestellt, welche die technischen Möglichkeiten und die zu erwartenden Schwierigkeiten abklären sollen, bevor ein definitives Projekt gestartet wird.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Die wesentlichen Programmziele sind sowohl bei den SOFC- als auch bei den PEM-FC-Systemen erreicht worden. Die Vernetzung der Aktivitäten zwischen dem PSI, den Hochschulen, Fachhochschulen und der Industrie konnte in verschiedenen Projekten stark verbessert werden, was eine wichtige Forderung im Forschungs- und Umsetzungsprogramm Wasserstoff/Methanol-Brennstoffzelle 2000-2003 [29] der CORE ist. Mit der Demonstration des *BRESA*-Projekts konnte ein sehr ambitioniertes Ziel erreicht werden. Der mit PSI-Brennstoffzellen und Supercaps ausgerüstete Personenwagen konnte mit dieser Passfahrt und an verschiedenen Ausstellungen der breiten Öffentlichkeit vorgestellt werden.

Das *Powerpac*-Projekt ist auf gutem Weg zur Realisierung des mobilen 1 kW-Brennstoffzellensystems mit integrierter Luftbefeuchtung.

Die Anwendung von Brennstoffzellen in Booten (*Hydroxy3000*) ist recht vielversprechend und lässt sich eventuell eher verwirklichen als die zukünftige Anwendungen in Automobilen.

Bei den mehr grundlagenorientierten Projekten wurde vor allem Fortschritte in der Bereitstellung von diagnostischen Werkzeugen und Methoden und bei der Simulation der Brennstoffzellenprozessen erzielt. Diese Arbeiten sind mehr auf langfristige Erfolge ausgerichtet und können im Moment kaum bewertet werden.

Für den Bereich Wasserstoff-/Methanol-Brennstoffzellen wurde Anfang 2002 ein Programm für Forschung und Entwicklung 2000 – 2003 [29]

zuhanden der Eidg. Energieforschungskommission CORE ausgearbeitet und von der CORE zur Ausführung freigegeben. Das geforderte Zusammenlegen aller Brennstoffzellenarbeiten konnte im Jahr 2002 realisiert werden. Hinsichtlich der SOFC-Zukunftsprojekte ist ein Evaluierungsverfahren für die Möglichkeiten der Miniaturisierung von Hochtemperaturbrennstoffzellen (SOFC) im Gange. Falls dies möglich wäre könnten ganz neue Anwendungen für die SOFC erschlossen werden.

IEA Beteiligungen sind hinsichtlich internationale Kontakte wünschenswert, ihr Einfluss auf die Projekte im Brennstoffzellenprogramm ist aber nicht in allen Fällen überzeugend.

Arbeitsprogramm 2003:

- Abschluss des PowerPac-Projekts mit Demonstration der mobilen 1kW-Brennstoffzelle und Suche nach einem industriellen Leadpartner für die PowerPac-Technologie
- aktive Unterstützung des PEM-Technologie-transfers von PSI/ETH-Zürich an die HTA Biel aktiv weiterführen
- kritische Bewertung der SOFC-Miniaturisierungsmöglichkeiten aus dem OneBat Start-Projekt; Formulierung eines Folgeprojekts falls die Beurteilung positiv ausfällt
- Fortsetzung der gemeinsamen Modellierungsaktivitäten für die PEM- und SOFC-Brennstoffzellen.
- IEA-Beteiligungen fortsetzen, Nutzen neu evaluieren

- das im Jahr 2001 gestartete und für 2002 sistierte Projekt [21], eine Übersicht über die Beteiligten an der Brennstoffzellentechnologie in der Schweiz zu erheben, soll 2003 fertiggestellt werden
- Internet-Auftritt des Programms Brennstoffzellen realisieren
- Verstärkung der Kommunikation innerhalb der einzelnen Projekte

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

Mit den angegebenen e-Mail-Adressen können die Berichte angefordert werden

- [1] G. Scherer et al. (guenther.scherer@psi.ch), PSI, Villigen: **Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H₂ oder Methanol als Brennstoff**, (JB), 78584/38468.
- [2] F. Grasser et al. (Felix.gasser@epfl.ch), EPF Lausanne: **Control System Oriented Dynamic Modeling of FC Systems**, (JB) 46794/86894.
- [3] D. Poulikakos (dimos.poulikakos@ltnt.mavt.ethz.ch), LTNT, ETH Zürich: **Novel Microstructured Materials for Fuel Cells**, (JB).
- [4] P. Holtappels et al. (peter.holtappels@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Anode supported PEN for SOFC**, (JB) 38348/78124.
- [5] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Science Park PSE-C, Lausanne: **Anode Supported SOFC with thermal cycling and redox stability**, (JB) 87157/47039.
- [6] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Science Park PSE-C, Lausanne: **Bandherstellverfahren ASE-SOFC für Brennstoffzellen**, (SB) 83430/43428.
- [7] D. Larrin et al. (diego.larrain@epfl.ch) EPF Lausanne: **Transient response and degradation behaviour in novel SOFC short stacks**, (JB) 46795/86895.

Liste der P+D-Projekte

- [8] P. Dietrich et al. (philipp.dietrich@psi.ch), PSI, Villigen: **Personenwagen mit Brennstoffzellen- und Supercap-Antrieb**, (SB) 39388-9/79164-5.
- [9] J. Affolter (affolter@eivd.ch), EINEV Yverdon: **Pile PEM pour Hydroxy 2000**, 83693/4369.
- [10] J. Affolter (affolter@eivd.ch), EINEV Yverdon: **Integration des Système pour Hydroxy 2000**, 83692/4369.
- [11] F. Büchi et al. (Felix.buechi@psi.ch), PSI, Villigen: **Entwicklung eines mobilen 1 kW BZ-Systems (PowerPac)**, (JB) 84688/44614.
- [12] J. Evertz (joerg.evertz@tribecraft.ch) Tribecraft AG, Zürich: **Analyse der Dichtung PowerPac**, (SB) 47454/87535.
- [13] M. Höckel (hkm@hta-bi.bfh.ch), Hochschule für Technik und Architektur Biel: **Brennstoffzellenfahrzeug SAM, Phase I**, (JB) 47037/87156.
- [14] M. Jenne (Markus.Jenne@sulzer.com), Sulzer Hexis Ltd., Winterthur: **Lully Hexis Biogas**.
- [15] K. Honegger (kaspar.honegger@sulzer.com), Sulzer Innotec Winterthur: **SOFC-APU Advanced FuelCell Stack (AFCS)**, (JB) 44048/84107.
- [16] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Science Park PSE-C, Lausanne: **1000W_e SOFCONNEX based Stack Demonstration**, (JB) 46775/86875.

- [17] N. Autisser et al. (nordahl.autisser@epfl.ch) EPF Lausanne: **Dynamic SOFC system model using gPROMS**, (JB) 46635/86755.
- [18] G. Robert (gilles.robert@sulzer.com), Sulzer Innotec, Winterthur: **OneBat Start**, (JB) 47036/87155.
- [19] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENZ Basel: **IEA Task XII Stationäre Brennstoffzellen Demonstration und Markteinführung**, (JB) 41000/80899.
- [20] A. McEvoy (augustin.mcevoy@epfl.ch) EPF Lausanne: **IEA Task XIII SOFC Brennstoffzellen und EU Informationsaustausch**, (JB) 36926/76732.
- [21] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENZ Basel: **Übersicht der Beteiligten an der Brennstoffzellentechnologie in der Schweiz**, 43450/83450.

Referenzen

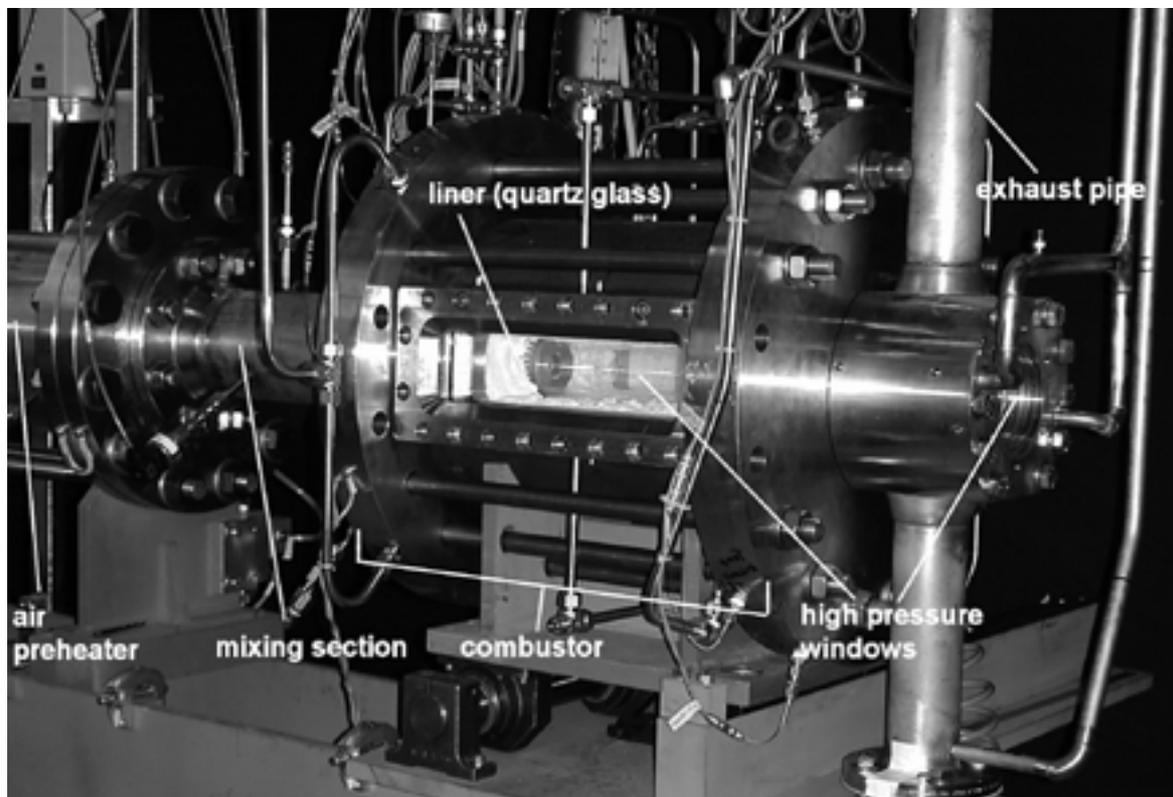
- [22] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, Science Park PSE-C, Lausanne: **Développement d'un système de piles à combustible de type SOFC basé sur la technologie des couches minces d'électrolyte sur support anode**, (SB), KTI Projekt 5041.2.
- [23] M. Roos (markus.roos@zhwin.ch), Zürcher Hochschule Winterthur: **Ausbau SOFC-Simulationstool**, (JB), KTI-Projekt 5584.2.
- [24] M. Höckel (hkm@hta-bi.bfh.ch), Hochschule für Technik und Architektur Biel: **Bau eines dynamischen Teststandes für Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen für mittlere und stationäre Anwendungen im Leistungsbereich bis 10kW**, (SB), KTI-Projekt 4365.3.
- [25] U.A. Paulus: **Electrocatalysis for Polymer Electrolyte Fuel Cells: Metal Alloys and Model Systems**, Dissertation Nr. 14795, ETH Zürich, 2002.
- [26] B. Andreaus: **Die PEM Brennstoffzelle, Charakterisierung ausgewählter Phänomene durch elektrochemische Impedanzspektroskopie**, Dissertation Nr. 2598, ETH Lausanne 2002.
- [27] A. B. Geiger: **Characterization and Development of Direct Methanol Fuel Cells**, Dissertation Nr. 14872, ETH Zürich 2002.
- [28] Ph. Lüchinger et. al.: **Fuel Cell SAM**, Diplomarbeit HTA Biel, Dezember 2002.
- [29] A. Hintermann (alphons.hintermann@bfe.admin.ch), BFE, Bern: **H₂/Methanol-Brennstoffzellen, Forschungs- und Umsetzungsprogramm 2000 - 2003**, Dezember 2001.

FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2002

Alphons Hintermann

alphons.hintermann@bfe.admin.ch



Hochdruck-Verbrenungsprüfstand am Paul Scherrer Institut (Bildquelle: P. Griebel, PSI, 2002)

Das Quarzglas in der Bildmitte erlaubt im Projekt **Struktur turbulenter Vormischflammen unter Hochdruck** laser-optische Messungen am Prüfstand. Ideale Voraussetzungen zur Validierung der numerischen Modellierung von Verbrennungsprozessen unter hohem Druck

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Nach wie vor decken fossile Energieträger einen Grossteil des Schweizer Energiebedarfs. Zwecks Entschärfung der CO₂-, der Emissionsproblematik und der Ressourcenschonung sowohl fossiler als auch nachhaltig erzeugter Brennstoffe liegt die Bedeutung des Programms Verbrennung daher klar auf der Linie der **simultanen Verbesserung der Energieeffizienz und der Reduktion von Emissionen technischer Verbrennungssysteme** [27].

Um diese ingenieurmässige Gratwanderung zu ermöglichen, müssen die Grundlagen moderner Verbrennungstechnologien erarbeitet, verstanden und anschliessend in käuflichen Produkten umgesetzt werden. Das Programm trägt zu dieser anspruchsvollen Aufgabe bei, indem es Mittel bereitstellt, damit die international konkurrenzfähigsten Forscher stets an vorderster Front mithalten können. Die seit Beginn des Programms definierte **Fokussierung der Forschung auf experimentelle Messtechnik, numerische Simulation, Schadstoffreduktion mit optimaler Energieeffizienz und die Schadstoffanalytik** hat sich – ebenso wie die Kontinuität der Förderung – bewährt. Die Projekte in diesen Schwerpunkten haben meist generischen Charakter und das erarbeitete Fachwissen ist daher bei allen Verbrennungstechnologien einsetzbar. Dank diesem Know How ist sowohl in den BFE geförderten P+D-Projekten als auch in den KTI-Projekten eine effiziente Zusammenarbeit zwischen Hochschul-, Fachhochschul- und Industriepartnern im In- und Ausland gewährleistet.

Bei der Umsetzung liegen die Schwerpunkte in der Motoren- und Gasturbinentechnologie:

- In der **motorischen Verbrennung** wird eng mit Motorenherstellern sowohl in der Schweiz (*Liebherr Machines SA, Iveco und Wärtsilä NSD*) als auch im Ausland (*GM, VW, Opel, Renault, ALV Graz, Iveco Turin, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. in Deutschland* [36, 37]) an der Umsetzung neuer Verbrennungstechnologien zusammen-

gearbeitet. Nicht zu unterschätzen ist auch die Zusammenarbeit mit Industriepartnern aus der Zulieferindustrie der Automobilbranche (*Kistler, Common Rail Technologies, Bosch, u.a.*).

- Verstärkt wurde im Berichtsjahr die ständig geförderte Zusammenarbeit mit der Firma *Alstom Power* in der **Gasturbinentechnologie**. Behandelt werden grundsätzlichen Fragen der heutigen und der nächsten Generationen von Turbinen. Es besteht eine enge Zusammenarbeit mit dem PSI und der ETH Zürich.

Diese generellen Ziele gemäss dem Mehrjahresprogramm **Feuerung und Verbrennung** [53] beinhalten die:

- Sicherstellung der Qualität und Kontinuität in Forschung und Entwicklung.
- Ausbildung von Studenten und Doktoranden auf dem Gebiet neuer, schadstoffarmer und energieeffizienter Verbrennungstechnologien.
- Verstärkte Umsetzung der Forschungsergebnisse mit neuen und bestehenden Industriepartnern.
- Erarbeitung eines Strategiepapiers zur künftigen Förderung der Verbrennungsforschung durch das BFE und Verabschiedung desselben durch die BFE-Geschäftsleitung.
- Fortsetzung der im Jahr 2001 gestarteten Vernetzung der Fachhochschulen in Sachen Verbrennungsforschung untereinander sowie mit den Hochschulaktivitäten (ETHZ, ETHL und PSI).
- Vernetzung dieses Fachwissens mit Industriepartnern und dessen Umsetzung zusammen mit Partnern aus der Motoren-, Brenner- und Gasturbinenbranche in marktfähige Produkte.

Das im Programm **Feuerung und Verbrennung** [53] geförderte Fachwissen ist an der ETH-Zürich im Laboratorium für Verbrennungstechnik und Verbrennungsmotoren (LVV), und im Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTNT) sowie am PSI und an der EMPA konzentriert.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

GRUNDLAGEN DER VERBRENNUNG

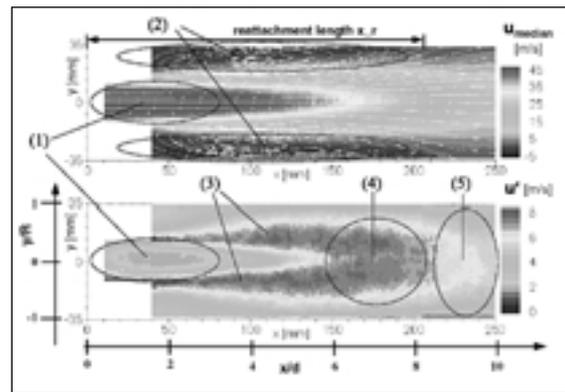
Ziel des Projekts **Turbulente, chemisch reaktive Strömung in Motorenkammern** [1] war, das Werkzeug der direkten numerischen

Simulation (DNS) zum vertieften Verständnis von generischen Fällen der Wechselwirkung zwischen Turbulenz und chemischer Kinetik einzusetzen und Wege aufzuzeigen, wie erste Berechnun-

gen für Flammen von technischer Bedeutung (in Anwendungen beim Industriepartner) in naher Zukunft modellfrei durchgeführt werden können. Beide Ziele sind praktisch vollständig erreicht worden. Als Beispiele für die Beschreibung von komplexen Interaktionen zwischen Strömungsparametern und laminaren Flammen sind einerseits eine detaillierte Untersuchung von gestreckten Diffusions- zu vorgemischten *edge-flames* und umgekehrt sowie andererseits instationäre Effekte (Löschen und Wiederzünden) von Diffusionsflammen am Gegenstrombrenner zu erwähnen. Beide Fälle sind wesentlich für das Verständnis und die Modellierung der turbulenten Verbrennung [49, 50]. Inzwischen ist in Zusammenarbeit mit dem *Argonne National Laboratory* eine voll parallelisierte 3-D Version für komplexe Geometrien mit *ein-Schritt*-Reaktionskinetik praktisch fertiggestellt und für erste DNS-Simulationen von Flammen bei turbulenten oder Übergangsströmungen einsetzbar.

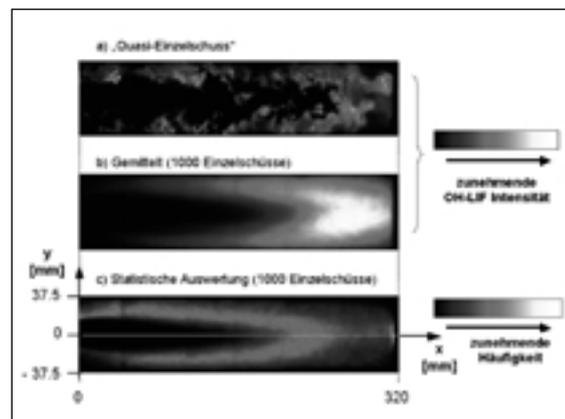
In den ersten beiden Jahren des Projekts **Struktur turbulenter Vormischflammen unter Hochdruck** [2] stand die Durchführung zweier Vorstudien zur Flammenstabilität und zu laminaren Flammen im Vordergrund: Diese umfassten den Aufbau des Hochdruck-Verbrennungsprüfstandes (siehe Titelbild) und die Bestimmung der mittleren Flammenposition in Abhängigkeit der Betriebsgrößen Druck, Temperatur, Luftzahl und Geschwindigkeit. In enger Zusammenarbeit mit einer anderen PSI-Gruppe konnte im Berichtsjahr die Charakterisierung der Strömung mit Hilfe von *Particle Image Velocimetry* erfolgreich durchgeführt werden. Die experimentelle Bestimmung der Turbulenzintensität und des turbulenten Makrolängenmasses war wichtige Voraussetzung für die gezielte Untersuchung des Einflusses der Turbulenz auf die Position und die Struktur der Flammenfront. Anhand umfangreicher Messungen konnten die Turbulenzintensität und das Makro-Längenmass bestimmt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Strömungsfeld in fünf Bereiche unterteilt werden kann: Kernzone (1), Rezirkulationszone (2), Scherschicht (3), hochturbulente Zone (4) und Dissipationszone (5) (s. Fig.1). Durch die Wahl der Gittergeometrie und -position kann die Turbulenzintensität in der Kernzone, die sich in der Nähe des Brennkammerkopfes befindet, gezielt beeinflusst werden. Weiter stromabwärts wird die Turbulenz vor allem durch die in der Scherschicht erzeugte Turbulenz bestimmt. Die maximale Turbulenzintensität beträgt ca. 20 % der massenstromgemittelten Geschwindigkeit. Alle Ergebnisse zeigen, dass die Turbulenzintensität proportional der massen-



Figur 1: Typische Verteilung der mittleren Axialgeschwindigkeit u_{median} und der Turbulenzintensität u' , (Quelle PSI)

stromgemittelten Geschwindigkeit ist. 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 (x-Koordinate) an.



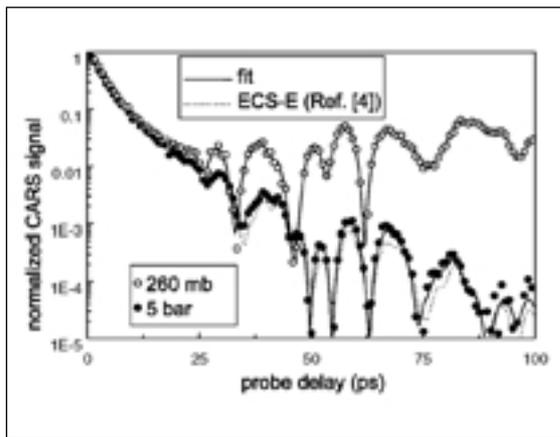
Figur 2: Resultate der OH-LIF Messungen: „Quasi-Einzelschussaufnahme“ (oben), gemittelte Aufnahme der OH-Intensität (mitte), statistische Auswertung der häufigsten Flammenposition (unten)

Die Messungen und statistische Auswertung der OH-LIF (laser-induzierte Fluoreszenz von OH-Radikalen) Aufnahmen (Fig. 2) zur Bestimmung der Position und der Struktur der Flammenfront zeigen, dass mit zunehmender Turbulenz, die Flamme kürzer und stärker gefaltet wird. Die Abnahme der Flammenlänge ist auf eine höhere turbulente Flammengeschwindigkeit zurückzuführen.

OPTISCHE MESSMETHODEN

Die PSI-Gruppe konzentriert sich im Projekt **Verbrennungsreaktionen in Gegenwart sauer-**

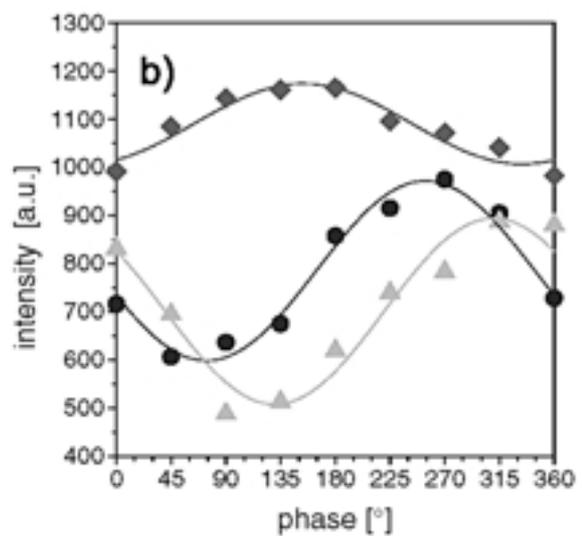
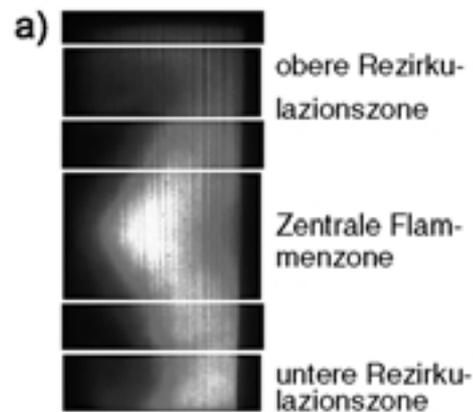
stoffhaltiger Brennstoffe [3] auf die Untersuchung von Formaldehyd, - ein wichtiges Zwischenprodukt in Flammen. Formaldehyd, H_2CO , spielt eine wesentliche Rolle für die Zündmechanismen eines brennbaren Gemisches. Zudem hängt die Erscheinung von H_2CO mit der Tendenz zur Russbildung zusammen. H_2CO tritt in Flammen sauerstoffhaltiger Brennstoffe, die eine kleinere Russneigung zeigen, in gösserer Konzentration auf als in Flammen reiner Kohlenwasserstoffe.



Figur 3: Experimentelle und gut übereinstimmende gefittete fs-CARS-Transienten in reinem Stickstoff bei Raumtemperatur und Drücken von 0.26 und 5 bar.

Mit resonanten, nichtlinearen spektroskopischen Methoden konnte das Spektrum von H_2CO untersucht werden. Die Messungen liefern Daten über den Energietransfer von Rotations- und Vibrationsanregungen im elektronischen Grundzustand von H_2CO . Auf dem Weg zur Untersuchung von Dissoziationsmechanismen mehratomiger Moleküle mit nichtlinearen femtosekunden Spektroskopien wurde die Linienbreite von Stickstoff CARS – (Kohärente Anti-Stokes Raman Spektroskopie) Übergängen bestimmt. Die zur theoretischen Beschreibung notwendigen Stossmodelle konnten so angepasst werden, dass nicht nur eigene, sondern auch Messungen anderer Gruppen mit hervorragender Genauigkeit wiedergeben werden können (Fig. 3).

Eine weitere PSI-Gruppe befasst sich im Projekt **Quantitative Laser Induced Fluorescence in Combustion** [4] mit der Anwendung von LIF sowohl bei Gasturbinenbrennern wie auch bei Laborbrennern. Ziel in beiden Brennern ist die Bestimmung von Ort, Form und wenn möglich der Bewegung der Flamme, sowie von der Konzentration des Brennstoffs und anderen Komponenten.



Figur 4: Räumliche Zuordnung der OH-LIF-Wirkungsquerschnitte (links); Variationen der OH LIF Intensität (rechts) in der zentralen Flammenzone (\blacklozenge), in der unteren- (\blacktriangle) und oberen (\bullet) Rezirkulationszonen, sowie deren zugehörigen sinusoidalen Fits (---) für eine Oszillationsperiode.

In einem Gasturbinenbrenner wurden zusammen mit dem Industriepartner *Alstom* thermoakustische Verbrenungsinstabilitäten mittels 2-D-LIF des Radikals OH untersucht. Die phasengemittelten Daten (bezüglich der dominierenden akustischen Schwingung) zeigen periodische Intensitäts- und Positionsschwankungen. Es wurde gezeigt, dass die periodische Bewegung der Flamme nicht allein von der akustischen Bewegung im Gas, sondern zur Hauptsache durch eine periodische Veränderung von Parametern der Verbrennung hervorgerufen wird. Ferner wurde für eine Reihe von Brennerkonfigurationen die relative Phasenlage von Schallschwingung, Flammenbewegung und OH-LIF-Intensität (Fig. 4a) bestimmt. Mit einer Phasenverschiebung (Fig. 4b) von etwa 30-50° folgt das Maximum der LIF-Intensität dem Maximum der Flammengeschwindigkeit gegenü-

ber dem strömenden Gas. Ziel bei den Labor-Gegenstrombrennern ist die Bestimmung der Flammenformen. Zudem sollen die Konzentrationen ausgewählter Gaskomponenten in solchen Brennern bestimmt werden. Die gemessenen Grössen werden mit Resultaten von DNS-Rechnungen verglichen. Im Berichtsjahr wurde ein verbesserter Gegenstrombrenner mit regelbarer Versorgung für die Luft- und Brennstoffzufuhr aufgebaut. In einem ersten Schritt wurden die Stabilitätszonen für Diffusions- und sogenannte Edge-Flamen bei der Verbrennung von Methan mit Luft bestimmt.

In den Projekten **Schadstoffreduktion durch Teil-Vormischung** [5] und **Experiment turbulente Gegenstromflamme** [6] wurden Messungen des Strömungsprofils am turbulenten Gegenstrombrenner (Fig. 5) durchgeführt. Dieses ist im Rahmen der experimentellen Unsicherheit radialsymmetrisch und reproduzierbar, so dass die Randbedingungen für nachfolgende numerische Arbeiten gut bekannt sind. Am selben Brenner wurden mittels Raman-Spektroskopie Temperaturen und Konzentrationen der Hauptspezies vorerst im laminaren Betrieb durchgeführt. Die Existenz der Doppelflammenstruktur bei teilvorgemischten Flammen im fetten Bereich wurde bestätigt und wurde bei höheren Äquivalenzverhältnissen beobachtet als dies der GRI-Mechanismus für Methanverbrennung vorhersagt. Die LDA-Messungen von Stroomer am kalten Ringbrenner zeigten interessanterweise, dass trotz symmetrischen Randbedingungen das Strömungsfeld hinter der Stauscheibe unter speziellen Bedingungen starke Asymmetrien aufweisen kann.



Figur 5: LDA-Laserstrahl misst das Strömungsprofil am Düsenaustritt des Gegenstrombrenners

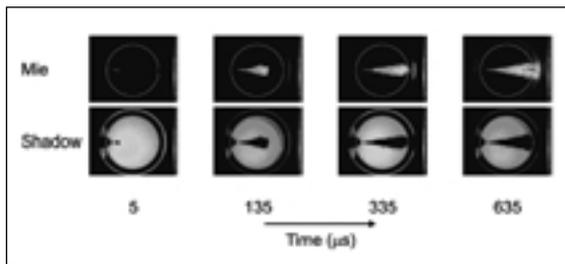
Das Projekt **Struktur turbulenter Diffusionsflammen** [7] liefert Beiträge zur Modellierung von nicht vorgemischter und teilvorgemischter turbulenter Verbrennung. Die beiden Modelle für nicht vorgemischte Verbrennung, die Wahrscheinlichkeit-Dichtefunktion (PDF) der Transport-Glei-

chungsmodelle und das Laminar-Flamelet-Modell wurden kombiniert. Das neue TLFM/PDF-Modell zielt darauf ab, die Vorteile der beiden Modelle zu kombinieren und gleichzeitig ihre Nachteile zu vermeiden. Der gewählte Kompromiss soll den Mischungsbruch (skalare Erhaltungsgrösse) mit der PDF-Transportgleichung lösen und die Anwendung von PDF's mit vorgegebener Form, wie dies bei den klassischen Flamelet-Modellen der Fall ist, vermeiden. Die skalare Dissipation bestimmt Zustände von lokalem Verlöschen und die Reaktionsfortschrittsvariable definiert die Bedingungen der Teilvormischung. Die Studien wurden basierend auf Freistrahlfammen (mit Pilotflamme) durchgeführt und waren Arbeitsunterlage eines internationalen Workshops. Die Geschwindigkeit, der Mischungsbruch, die Temperatur und der Massenbruch der Spezies werden berechnet und zeigen eine bessere Übereinstimmung mit dem Experiment. Mit einer Dissertation [38] wurde dieses Projekt im Berichtsjahr abgeschlossen.

Im interdisziplinären Verbundprojekt der drei ETH-Zürich Institute SAM, LAV und LTNT **Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung** [8] entwickelt das SAM eine neuartige, multidimensionale Lagrange-Transportmethode höherer Ordnung. Die neue Methode basiert auf der Beschreibung von Fluidelementen als *Lagrange-Finite* Volumen, welche transportiert und deformiert werden. Im LTNT wurden LES-Berechnungen an einer kalten *Bluff Body*-Strömung durchgeführt und die Resultate mit denjenigen einer bestehenden U-RANS-Berechnung verglichen. Die Modellierung der skalaren Dissipation erwies sich als Schlüsselgrösse und bietet eine ganze Reihe von Möglichkeiten an, die in der nächsten Projektphase ausgetestet werden. Das LAV schlägt Lösungen vor, um den Anstieg der räumlichen Auflösung von LES mit zunehmender Reynolds-Zahl zu reduzieren. Eine Modell-Modifikation (*Intermittency Correction*) wurde für inkompressible Kanalströmungen getestet. Die Resultate zeigen deutlich das Potenzial einer solchen Modifikation in Bezug auf die Reduktion der räumlichen Auflösung und daraus resultierend der Rechenzeiten.

SCHADSTOFFREDUKTION UND -ASPEKTE

Für die Untersuchung der Verbrennungsmechanismen in einem Diesel-Motorzyklus steht am PSI ein in Zusammenarbeit mit dem ETH-Labor für Verbrennungsmotoren 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-

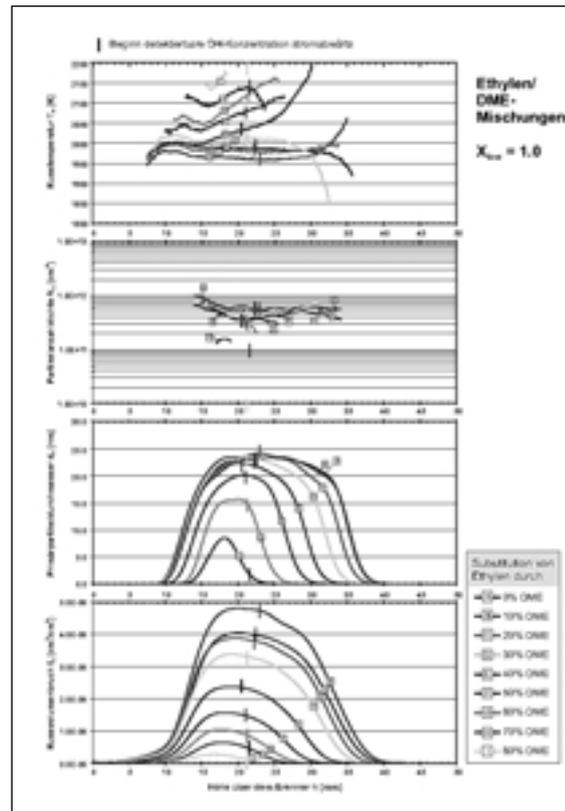


Figur 6: Typische Sequenz von gemessenen Streubildern (obere Zeile) und Schattenbildern (untere Zeile) für Dieselbrennstoff Sprays bei 720 K ($P_{inj}=1000$ bar, $P_{cell}=40$ bar).

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 zugänglich gemachten 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 degradiert werden. Im Projekt *Investigation of Spray combustion in Constant Volume Combustion Cell* [9] wurde die Ausbreitung von Diesel-Sprays bei verschiedenen Drücken und Temperaturen vermessen (Fig. 6) und mit Modellen verglichen. Die Messmethoden zur Erfassung der Russbildung wurden in Experimenten mit einem Wolfhard-Parker Brenner entwickelt. Zeitlich aufgelöste *Laser induzierte Inkandescenz* (LII) und Messungen des elastisch gestreuten Lichtes liefern den Russvolumenbruch, die Russ-Teilchenanzahl und -Teilchengröße [39, 40].

In Zusammenarbeit mit der Gruppe Reaktionsanalyse des PSI [9] wurden auf Ende 2002 zwei Dissertationen [41, 42] im Projekt *Modellierung und Validierung von reaktiven, instationären 2-Phasen-Strömungen* [10] beendet. Im Teil *Einfluss von sauerstoffhaltigen Brennstoffen auf die Russbildung in einer Diffusionsflamme* [41] wurden mittels verschiedener laseroptischer Messtechniken die Russparameter Russvolumenbruch (fv), Primärpartikeldurchmesser (dP) und Russtemperatur (TR) in laminaren Diffusionsflammen für verschiedene Zumischungen der Testbrennstoffe Dimethylether (DME, sauerstoffhaltig) und Ethan (parafinisch) zum Basisbrennstoff Ethylen (olefinisch) bestimmt (Fig. 7). Die experimentellen Ergebnisse zeigen für beide Versuchsbrennstoffe eine Reduktion des Russes in der Flamme, wobei DME die Russbildung wesentlich wirksamer unterdrückt und die Russoxidation fördert. Erklärungsansätze

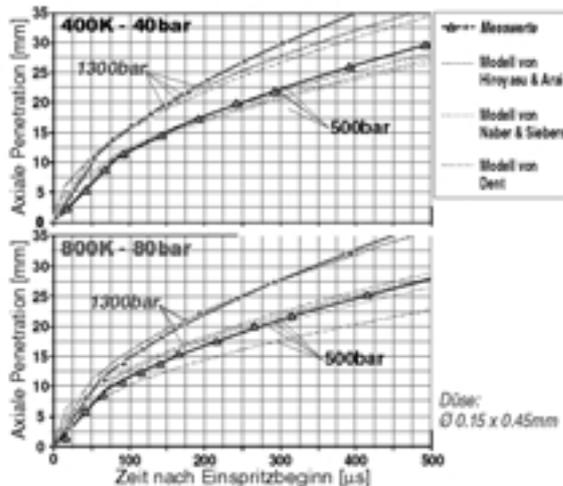
können durch die numerische Simulation der jeweiligen Reinbrennstoffflammen geliefert werden. Gleichgewichtsberechnungen ergeben eine Erhöhung des Wassergehaltes in der Flamme, was eine Russminderung verursachen kann. Die experimentellen Resultate liegen in einer umfangreichen Datensammlung vor, welche zur Validierung und Verbesserung zukünftiger numerischer Russmodelle herangezogen wird.



Figur 7: Russparameter entlang der Flammenachse für Ethylen/DME-Flammen

Im Teil *Experimentelle Untersuchungen zu Spraystruktur in transienten, verdampfenden und nicht verdampfenden Brennstoffstrahlen unter Hochdruck* [42] wurde die zeitabhängige Ausbreitung des Einspritzstrahls mit der Schattenbildtechnik erfasst. Als Versuchsträger diente die Hochtemperatur- und Hochdruckzelle des LAV. Der Einsatz der Konstantvolumenzelle erlaubte eine sehr grosse Variation der Umgebungsbedingungen für die Experimente, wodurch neue Erkenntnisse über das Einspritzstrahlverhalten unter hohem Gasdruck resp. bei hohen Gastemperaturen gewonnen werden konnten. Die lokalen Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten wurden mittels Phasen-Doppler-Anemometrie bestimmt. Sie geben Auskunft über die Qualität des Strahlauflaufs resp. der weiteren, sekundären Atomisierung. Die Auswirkung der

Gastemperatur auf die mittleren Tropfengrößen ist sehr gross, hingegen zeigt eine Variation der Gasdichte keinen Einfluss auf die entstehenden Tropfengrößen.



Figur 8: Gemessene und theoretische Penetrationsverläufe $S(t)$, Düsenspitze $\varnothing 0.15 \times 0.45 \text{ mm}$, Gaszustand: 400°K , 40 bar , respektive 800°K , 80 bar .

Die ermittelten Sprayparameter sind hochwertige Basisdaten respektive Referenzdaten für die numerische Simulation der Sprayausbildung. Die Parameterauswahl ist äusserst weit gefasst, was für die erforderliche Validierung von grossem Wert ist.

Beim Dieselmotor ist die Gemischbildungsqualität für die homogene Kompressionszündverbrennung magerer Gemische von hoher Wichtigkeit. Im Projekt **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse** [11] werden zündfähige, schwerverdampfende Kraftstoffe (meistens Dieseldestillate), die in flüssigem Zustand in den Brennraum eingespritzt werden, modellmässig und experimentell untersucht. Zur Berechnung 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. Die Ergebnisse zeigen, dass die Güte der Berechnungen von der verwendeten numerischen Auflösung (diese

ist abhängig von den charakteristischen Zeit- wie auch Längenmassen der Einspritzung) abhängen. Eine mit dem Experiment übereinstimmende Berechnung des Brennverlaufes ist die grosse Herausforderung in der 3-D-CRFD-Simulation. Das im Projekt verwendete Verbrennungsmodell basiert auf einem charakteristischen Zeitmass. Bei Simulationen im Teillastbereich hat sich herausgestellt, dass der Verbrennungsmodell-Parameter, der ursprünglich für die ottomotorische Vormischverbrennung vorgeschlagen wurde, auch für die dieselmotorischen Vormischverbrennung entscheidend ist.

Die Entwicklung neuer, energieeffizienter und schadstoffarmer dieselmotorischer Brennverfahren soll aufbauend auf den kürzlich am LAV abgeschlossenen Arbeiten in zwei Ende 2002 neu gestarteten Projekten weiter vorangetrieben werden. Die Resultate werden nicht nur für die Entwicklung neuer Brennverfahren von Bedeutung sein, sondern auch für diejenige neuer Injektoren und Einspritzsysteme und sind somit auch für die auf diesem Gebiet sehr starke Schweizer Zulieferindustrie für die Automobilbranche von strategischem Interesse. Da die optimale Energieeffizienz sowie die Bildung von NO_x und Russpartikeln in direktem Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung und der Gemischzusammensetzung abhängt, wird im Projekt **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** [12] das Verhalten der transienten Einspritzstrahlen (Strahlausbreitung, Tröpfchenspektren und -Verdampfung) genauer untersucht. Im Projekt **Dirkete numerische Simulation der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen** [13] soll durch die Weiterentwicklung zuverlässiger und genauer Simulationswerkzeuge die Optimierung von Verbrennungssystemen hinsichtlich des Zielkonflikts Energieeffizienz (CO_2 -Reduktion) und Schadstoffemissionen vorangetrieben werden. Der Rechenaufwand für technische, turbulente Flammen ist aber beträchtlich; ein PC-Linux-Cluster am LAV/ETHZ soll zusammen mit dem LAV 3-D DNS-Code erste modellfreie Simulationen einer turbulenten Flamme ermöglichen. Aus den DNS-Daten sollen robuste Modelle der turbulenten Verbrennung für noch höhere Reynolds-Zahlen, wie sie in technischen Verbrennungssystemen vorkommen, abgeleitet werden.

Nationale Zusammenarbeit

Die folgenden vier umsetzungsnahen KTI-Projekte sind voll 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** [28, 43] sind die für Ende 2002 vorgesehenen Meilensteine – Katalysatorscreening und Berechnungsmodell – zielgerecht erreicht worden. Die Erkenntnisse aus dem neu bewilligten Projekt **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brenner** [29] sollen in die Verbesserung der laufenden Generation von Alstom-Gasturbinen einfließen. Im neuen Projekt **Grundlagen der H₂-Reformat-Zumischung am Ottomotor** [30] erarbeiten die HTA Biel, das LAV und der Industriepartner 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 neuen Projekt **Industrietaugliche Lichtwellenleiter-Messkette zur Bestimmung der Russmenge, der Russtemperatur und des Zündverzugs im Verbrennungsmotor** [31] 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 Motorengeneration strengere Emissionsgrenzwerte erfüllt werden.

Im November 2002 lud das **Automotive Competence Network ACN-CH** mit Unterstützung der KTI zum *Automotive Day 2002* an der HTA Biel ein. Referenten aus der Automobil-Wirtschaft

und der (Fach-)Hochschulen informierten über aktuelle Forschungs- und Entwicklungsergebnisse.

Das im April 2002 an der EMPA Akademie in Dübendorf durchgeführte 11. Internationale Automobiltechnische Symposium war dem Thema **Verbrennungsmotoren – F&E-Aktivitäten Schweiz** gewidmet.

Der Vernetzung von Hochschulforschung mit den Fachhochschulen und der Privatwirtschaft diente die Tagung des Schweizerischen Vereins für Verbrennungsforschung (SVV) vom Oktober 2002, die unter dem Motto **Verbrennungsforschung an Fachhochschulen** an der Fachhochschule Yverdon abgehalten wurde. Das Angebot des BFE anlässlich der SVV Tagung 2001, sich vermehrt für Verlängerungen von Diplomarbeiten zu engagieren, wurde von der SHR in Rapperswil, der HTA Luzern [48] und Hes-SO in Freiburg genutzt und die entsprechenden Arbeiten in Yverdon vorgestellt.

Per Ende Berichtsjahr hat der SVV seine Kündigung als Schweizer Nationalkomitee bei der **International Flame Research Foundation** (IFRF) eingereicht. Daher bestand auch kein Grund mehr, den SVV als ein im Handelsregister eingetragener Verein weiterzuführen. Der SVV hatte daher anlässlich der Generalversammlung vom Oktober 2002 seine Auflösung als Verein beschlossen. Unter demselben Kürzel SVV bleibt aber weiterhin eine unstrukturierte Schweizer Vereinigung für Verbrennungsforschung bestehen, zu der ein freier Zugang ohne Formalitäten möglich ist. Die Koordination der SVV-Aktivitäten liegt neu beim LAV.

Internationale Zusammenarbeit

Am PSI wurde im März 2002 die jährlich stattfindende *European Conference on Nonlinear Optical Spectroscopy ECONOS 2002* mit 19 internationalen Referenten und rund 100 Teilnehmern erfolgreich durchgeführt.

Das *Joint Annual Meeting* 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 2002 an der ETH Zürich durchgeführt.

Die Zusammenarbeit im Rahmen des **IEA-Implementing Agreements Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion** findet praktisch nur bilateral auf Eigeninitiative statt. Trotzdem bietet das jährliche *Task Leaders Meeting* dieses Implementing Agreements, das im Juni 2002 in Trondheim durchgeführt wurde [51], 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.

Äusserst erfolgreich verlief die seit 1997 jährlich an der ETH-Zürich abgehaltene Nanopartikelkonferenz im August 2002, die vom BFE unterstützt wurde. Die Organisation teilten sich das LAV und die FH Aargau unter der Leitung von A. Mayer (TTM Niederrohrdorf). Etwa 250 Teilnehmer aus Europa, Nordamerika, dem fernen Osten und Australien nahmen an der Konferenz teil, um ihre Erfahrungen und neues Wissen zu Russpartikeln aus dieselmotorischer Verbrennung auszutauschen. Die CD-Rom [52] mit den *Proceedings* und weiteren Informationen wurde vom BUWAL finanziert.

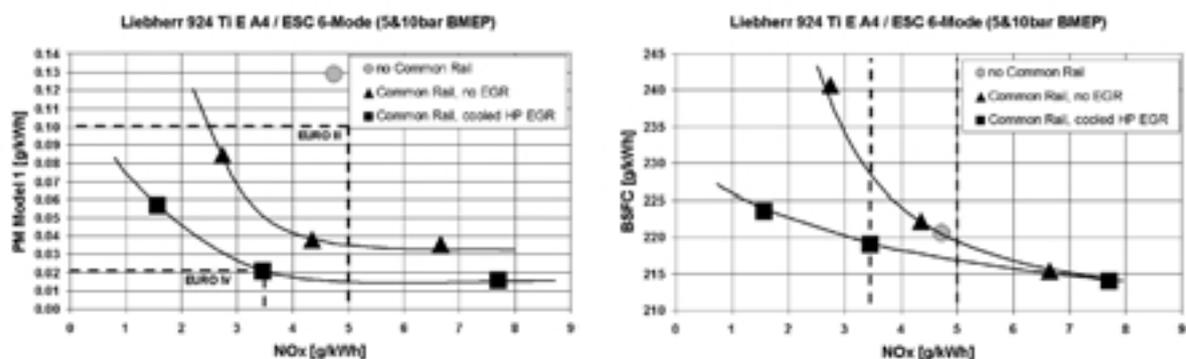
Im Jahr 2002 wurden innerhalb des 5. Rahmenprogramms der EU vier *Alstom Power*-Projekte in Zusammenarbeit mit der ETH-Zürich und dem PSI bearbeitet. Das PSI konstruierte im experimentellen Teil des Projekts **Advanced Zero Emission Power (AZEP) – Development of**

an Integrated Air Separation membrane-Gas Turbine [32] termingerecht den Dampfgenerator und den CO₂-Supplier sowie im numerischen Teil extensive Rechnungen für zahlreiche Verbrennungskonzepte zum AZEP-Prozess. Die Rechnungen am PSI waren in guter Übereinstimmung mit den Experimenten beim Industriepartner *Alstom Power*. Damit wurde gezeigt, dass die PSI-Rechencodes sich als Konstruktionswerkzeug für AZEP-Verbrennungsprozesse eignen. Die drei weiteren EU Projekte: **TARGET: The Influence of Tar Composition and Concentration on Fouling, Emission and Efficiency of Micro and Small scale Gas Turbines** [33], **AD700-2: Development of an Advanced(700°C) Power-Plant II** [34] und **CAME-GT: Thematic Network for Cleaner and More Efficient Gas Turbines** [35] sind nur indirekt ins Programm *Feuerung und Verbrennung* einbezogen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Nachdem im Rahmen des Vorgängerprojektes *Swiss Common Rail* am LAV bewiesen wurde, dass die EURO-III Normen prinzipiell ohne Abgasrückgewinnung (AGR) und Abgasnachbehandlung mittels *Hochdruck-Common-Rail-Einspritzung* erfüllt werden können, kommt die Motivation im Projekt **Common Rail Brennverfahren für EURO-III und EURO-IV-taugliche Nutzfahrzeugdieselmotoren** [14] aus der Herausforderung, für die *Liebherr*-Motoren noch schärfere Emissionsgrenzwerte (Niveau EURO-IV) zu erfüllen. Die Messungen am Vierzylindermotor bestätigen weitgehend das Potential der emissionsmindernden Massnahmen (Kombination von Hochdruckeinspritzung (*Common-Rail*) und gekühlter Abgasrückführung), die bereits am

Einzyylinder-Prüfstand erfolgreich appliziert und untersucht wurden. Die Umsetzung vom 1-Zylinder zu 4-Zylinder Motor unterscheidet sich in der Kombination von Abgasturbolader (Ladedruck) mit Abgasrückführungsrate. Zwei hochdruckseitige Abgasrückführungskonzepte (mit Positionierung der Abgas-Gegendruckklappe nach oder vor Turbine) wurden am Vollmotor implementiert. Gute Resultate wurden mit Abgasrückführungs-raten von über 30% bei Teillast und bis zu 10% bei mittleren Lasten erreicht. Emissionswerte unter den EURO-IV Grenzwerten für Partikel und NO_x wurden bei Teillast nachgewiesen; bei hohen Lasten wurde das Emissionsverhalten durch die Verwendung von 8-Lochdüsen mit erhöhter Austrittsfläche verbessert. Da der EURO IV Be-



Figur 9: Tradeoffs NO_x-Partikelemissionen und NO_x-Kraftstoffverbrauch, Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor. Die Werte resultieren aus der Gewichtung von 6 Prüfungspunkten im ESC-Testzyklus. Die Variationen entlang der Kurven wurden mit unterschiedlicher Einspritzstrategien und AGR-Anteile realisiert.

reich noch nicht erreicht wurde (Fig. 9), wird in den abschliessenden Messphasen versucht, mit Hochdruck-Einspritzung (*Common-Rail-System*), mit externer hochdruckseitig gekühlter Abgasrückführung, mit erhöhtem Ladedruckverhältnis und mit Diesel-Wasser-Emulsionen (bis zu 35% Wasser) die EURO IV Grenzwerte in einem weiten Drehzahl- und Lastbereich zu erfüllen.

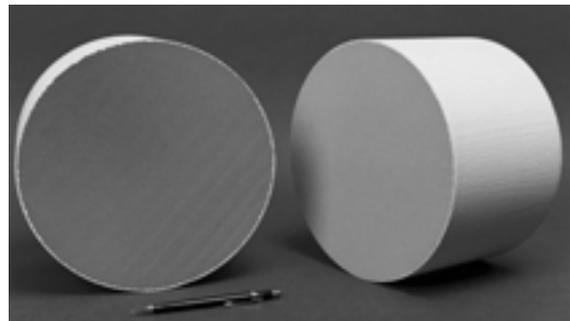
Im Berichtsjahr wurde das PSI-LAV-*Alstom*-Projekt **Homogene Gasverbrennung** [15] abgeschlossen. Das Projekt umfasste sowohl einen experimentellen Teil (ausgeführt durch PSI und *Alstom* bzw. *ABB*) als auch einen numerischen Teil (ausgeführt am LAV). Es konnte gezeigt werden, dass in geeignet modifizierten industriellen Gasturbinenbrennern – d.h. optischer Zugang mit UV-durchlässigem Quarzglas im Mischrohr (s. Fig. 10) – die Konzentration von verdampftem Heizöl mittels laser induzierter Fluoreszenz (LIF) mit einer Genauigkeit von ca. 25% gemessen werden kann. Dies ermöglicht eine Beurteilung der Homogenität der im Brenner vorhandenen Gas-Luft Mischung. Die Vormischung (Verdampfung des Heizöls und die anschliessende Mischung mit der Luft) wurde mittels neu entwickelter Modelle numerisch simuliert. Im Vergleich mit einer ersten LIF-Messung wurde der in der Simulation verwendete und nicht genau bekannte Parameter SMD (mittlerer Durchmesser der Öltröpfchen) bestimmt. Die Resultate der weiteren Simulationsrechnungen ergaben eine gute Übereinstimmung mit LIF-Messungen. Die durch die Messungen validierten numerischen Modelle sind mittlerweile in die bei *Alstom* verwendeten numerischen Codes eingebaut.



Figur 10: LIF-Messungen an einem modifizierten industriellen Gasturbinenbrenner

Mit dem Schlussbericht zum Projekt **NO_x-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels**

Harnstoff-SCR [16] geht am PSI eine langjährige Erfolgsgeschichte in der Entwicklung von Harnstoff-Entstickungsverfahren und neuartiger Beschichtungs-Katalysatoren für Dieselmotoren unter der Leitung von Dr. M. Koebel in neue Hände über. Auch die Umsetzung dieser Technologien ist gewährleistet, denn nur mit der Kombination von optimierter Verbrennung und Abgas-Nachbehandlung können die für 2005 bzw. 2008 vorgesehenen Abgasnormen EURO IV und EURO V erfüllt werden. Die Zusammenarbeit mit den Firmen *Liebherr* (Bulle) und *Oberland Mangold* (Garmisch Partenkirchen) und dem Institut für Mess- und Regeltechnik (ETHZ) umfasste den Aufbau eines grossen Gesamtsystems auf einem Motorenprüfstand bei *Liebherr*. Dort wurden unterschiedliche Katalysatorvarianten (Fig. 11) ebenso wie verschiedene Dosierstrategien für die Harnstofflösung getestet. Mit zwei Dissertationen [44, 45] wurden die Arbeiten abgeschlossen. Eine Publikation [47] wurde von der *Society of Automotive Engineers (SAE)* als eine der hervorragendsten Publikation im Jahr 2001 auf diesem Fachgebiet beurteilt. Die 221 von der *SAE* ausgewählten weltbesten technischen Literaturbeiträge des Jahres werden in den *SAE Transactions – Journal of Fuels&Lubricants* erscheinen. Ausserdem wird heute die am PSI entwickelte Katalysator-Beschichtungstechnologie in einer deutschen Firma umgesetzt.



Figur 11: Die Forschung an Katalysatoren umfasste die Optimierung der Zellenzahl und Beschichtung

Nach den erfolgreichen Abschlüssen mehrerer P+D-Projekte wurden im Spätherbst 2002 folgende P+D-Projekte neu gestartet:

Im Projekt **CFD-Simulation Dreizugkessel** [17] werden die am LTNT entwickelten CFD-Programme an einem Dreistufenkessel der Firma *YGMS AG* eingesetzt mit dem Ziel, dessen exergetischen Wirkungsgrad im Brennersystem zu verbessern und gleichzeitig die Kondensation der Abgase zu vermeiden sowie die Emissionen zu reduzieren [46].

Im LAV-Projekt **Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO₂-Ausstoss** [18] hat der Industriepartner *Liebherr* nach der Grundausslegung der V4-Zylinderköpfe für die neue Motorengeneration auch deren Konstruktion fertiggestellt. Erste Dauerlaufversuche am Prüfstand in Bulle zeigen ermutigende Ergebnisse im Hinblick auf die mechanische und thermische Belastbarkeit der Brennraumkomponenten, insbesondere der neuen Kolben. Zur Zeit wird der Umbau des 1-Zylinder Forschungsmotors am LAV/ETHZ in Angriff genommen, wobei nebst der messtechnischen Ausrüstung für die neue Ausführung (inkl. neues Einspritzsystem) vor allem die Änderung der Kurbelwelle wegen der nötigen Fremdvergabe des Umbaus einige Zeit in Anspruch nehmen wird. Am LAV laufen zur Zeit umfangreiche Optimierungsarbeiten für das neue Brennverfahrenssystem, bei denen die Entwicklung der entsprechenden statistischen Werkzeuge für die Versuchsplanung in Angriff genommen wird. Parallel dazu wird mit der Zusammenarbeit ETHZ/EMPA betreffend die Russuntersuchungen durch Entnahmesonden angefangen.

Ziel des LAV-Projekts **Massnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** [19] ist die Darstellung eines neuen PKW-Antriebs, der bei vollem Potential zur Erfüllung von Nullemissionsstandards (bezogen auf CO, UHC, NO_x, Russ), eine spezifische CO₂-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 Null-

emissionstauglichkeit jedoch noch nicht gegeben) ausgegangen, womit Infrastrukturprobleme betreffend Kraftstoffversorgung ausgeschlossen werden können.

Das LTNT-Projekt: **Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner** [20] und das PSI-Projekt **Struktur und Brenneigenschaften von turbulenten vorgemischten Hochdruckflammen** [21] sollen wichtige Beiträge zur weiteren Optimierung der mageren Vormischverbrennung für stationäre Gasturbinen liefern und die gewonnenen Erkenntnisse direkt in die Entwicklung der nächsten Generation von schadstoffarmen Gasturbinen beim Industriepartner *Alstom* einfließen.

Im PSI-Projekt **Partial Catalytic Oxidation Processes for Power Generation Application** [22] wird den Anforderungen der Entwicklungstrends nach noch geringere Emissionen (NO_x < 10ppm) und höheren Wirkungsgraden ($\eta > 60\%$) – nachgegangen. Es wird nach neuen Brennverfahren geforscht, da die konventionelle Vormisch-Verbrennungstechnik den Forderungen nach noch geringerer Emissionen mittelfristig nicht mehr gerecht werden kann. Vielversprechende Alternativen stellen katalytisch unterstützte Verbrennungsverfahren dar, da sie auf grundsätzlich anderen Brennstoff-Umwandlungsverfahren basieren. Für den mageren Betrieb (Luft-Überschuss) sind am PSI schon zahlreiche Entwicklungsprojekte durchgeführt worden (auch beim Industriepartner *Alstom Power*). Mit Prototypen sind schon erste Maschinen Tests in kleinen Gasturbinen durchgeführt worden, die für das *upscaling* jedoch noch einen weiteren Entwicklungsbedarf aufgezeigt haben.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Die für das Berichtsjahr vorgesehenen **Ziele sind fast alle erreicht worden:**

- Die Qualität und Kontinuität in den Projekten stimmte und die Umsetzung konnte durch neue Zusammenarbeitsprojekte mit Industriepartnern weiter gesteigert werden.
- Der im Jahr 2001 begonnene Prozess, die Fachhochschulen untereinander und mit den Hochschulaktivitäten (ETHZ, ETHL und PSI) zu vernetzen ist weitergeführt worden. Nach wie vor erfolgt die Vernetzung projektweise (BFE- und KTI-Projekte) [23, 24, 25, 30] und somit in kleinen Schritten. Zur Realisierung einer ganzheitlichen Vernetzung müssten mehr Impulse seitens der Fachhochschulen und der

Privatwirtschaft kommen, z. B. mit klaren Leadpositionen/ -Ansprüchen in wohldefinierten Themen (z.B. im Gasturbinentechnologiebereich).

- Aus der geplanten Entwicklung eines verbesserten Varino-Brenners zusammen mit der HTA Luzern, mit *IGNIS* und dem LTNT wurde einstweilen erst ein LTNT-*IGNIS*-Projekt definiert, das aber im Jahr 2003 gestartet wird. Die Zusammenarbeit mit der HTA Luzern ist dabei noch nicht gesichert.
- Das Strategiepapier zur künftigen Förderung der Verbrennungsforschung z.Hd. der BFE-Geschäftsleitung [26] wird erst Anfang 2003 zur Verfügung stehen.

- Die Darstellung des Programms Verbrennung unter www.energie-schweiz.ch musste aus Zeitgründen auf 2003 verschoben werden.

Speziell zu erwähnen sind:

- Im Berichtsjahr konnten insgesamt 11 Dissertationen [36 - 46] abgeschlossen werden. Dieser Ausbildungseffekt, unterstützt durch die BFE-Mittel, ist nicht zu vernachlässigen. Die promovierten Ingenieure bilden in der Privatwirtschaft die Vorstufe für künftige energiebewusste Kaderleute.
- Folgende Mittel der öffentlichen Hand (BFE, KTI und EU) sind im Jahr 2002 in die P+D-Schwerpunkte geflossen:
- **Gasturbinentechnologie:** 1,2 Mio CHF
- **Motorentechnologie:** 0,9 Mio CHF

Im Jahr 2003 soll:

- die Qualität und Kontinuität in Forschung und Umsetzung weiterhin durch neue ambitionierte Projekte sichergestellt werden,

- das Forschungsprogramm **Feuerung und Verbrennung 2004 – 2007** zuhanden der CORE ausgearbeitet werden. Das **Strategiepapier Verbrennungsforschung** wird dazu eine vom BFE abgesegnete Basis liefern,
- der weitere Einbezug der Fachhochschulen ins Programm gefördert und entsprechende Netzwerke definiert werden, z.B. ein gasturbinenorientiertes Netzwerk zusammen mit *Alstom Power*,
- die SVV Tagung 2003 an der FH Fribourg unter dem Motto **Schadstoffminimierung in Verbrennungssystemen** abgehalten werden,
- der Anschluss an das 6. Rahmenprogramm der EU (im Rahmen eines IP oder Netzwerks of Excellence) geschafft werden,
- das Programm *Feuerung und Verbrennung* im Internet dargestellt werden [54].

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden

- [1] C. Frouzakis (frouzakis@lav.mavt.ethz.ch) et al. LAV/ETH, Zürich: **Turbulente, chemisch reaktive Strömung in Motorenkammern** (SB).
- [2] P. Griebel (peter.griebel@psi.ch), PSI, Villigen: **Struktur turbulenter Vormischflammen unter Hochdruck** (JB).
- [3] T. Gerber (thomas.gerber@psi.ch) et al. PSI, Villigen: **Verbrennungsreaktionen in Gegenwart sauerstoffhaltiger Brennstoffe** (JB).
- [4] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et. al., PSI, Villigen: **Quantitative Laser Induced Fluorescence in Combustion** (JB).
- [5] P. Bajaj (juerg.gass@ethz.ch), LTNT/ETH, Zürich: **Schadstoffreduktion durch Teil-Vormischung** (SB).
- [6] A. Prospero und L. Blum (juerg.gass@ethz.ch), LTNT/ETH, Zürich: **Experiment turbulente Gegenstromflamme** (JB).
- [7] L. Demiraydin und J. Gass (juerg.gass@ethz.ch), LTNT/ETH, Zürich: **Struktur turbulenter Diffusionsflammen** (JB)
- [8] R. Jeltsch (rolf.jeltsch@ethz.ch) et al., SAM/ETH, Zürich: **Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung** (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@lv.iet.mavt.ethz.ch) et al., LAV/ETH, Zürich: **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse** (JB).

- [12] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH, Zürich: **Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung** (ZB).
- [13] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH, Zürich: **Dirkete numerische Simulation der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen** (ZB).

Liste der P+D-Projekte

- [14] R. Schubiger (rafael.schubiger@lvv.iet.mavt.ethz.ch) et al., LAV/ETH, Zürich: **Common Rail Brennverfahren für EURO-III und EURO-IV-taugliche Nutzfahrzeugdieselmotoren** (JB)
- [15] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et al., PSI, Villigen: **Homogene Gasverbrennung** (SB)
- [16] M. Koebel (manfred.koebel@psi.ch), PSI, Villigen: **NO_x-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR** (SB)
- [17] J. Gass (juerg.gass@ethz.ch) et al., LTNT/ETH, Zürich: **CFD-Simulation Dreizugkessel** (JB)
- [18] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH, Zürich: **Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO₂-Ausstoss** (JB).
- [19] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH, Zürich: **Massnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus** (JB).
- [20] J. Gass (juerg.gass@ethz.ch) et al., LTNT/ETH, Zürich: **Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner.**
- [21] P. Griebel (peter.griebel@psi.ch), PSI, Villigen: **Struktur und Brenneigenschaften von turbulenten vorgemischten Hochdruckflammen**
- [22] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al., PSI, Villigen: **Partial Catalytic Oxidation Processes for Power Generation Application.**
- [23] M. Wenger (wjanach@hta.fhz.ch), HTA, Luzern: **Erweiterung Diplomarbeit p-Booster-Druckspeicher für turbolader-Dynamik** (SB)
- [24] R. Bunge (rainer.bunge@hsr.ch), HSR, Rapperswil: **Stickoxidreduktion bei mobilen Dieselmotoren**
- [25] J. P. Corbat (jpierre.corbat@eif.ch), EIF, Freiburg: **Motorenprüfstand für Messungen an Partikelfiltern am Liebherr Dieselmotor** (SB)
- [26] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH, Zürich: **Strategiepapier Verbrennungsforschung** (SB)
- [27] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH, Zürich: **Umwandlungseffizienz von Brennstoffzellen und Verbrennungskraftmaschinen für die stationäre, dezentrale Energieversorgung** (JB)
- [28] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al., PSI, Villigen: **Modellierung und Auslegung eines CO₂ und NO_x freien Brenners für Alstom Power Gasturbinen**
- [29] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et al., PSI, Villigen: **Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brennern**
- [30] J. Czerwinski (jan.czerwinski@hta-bi.bfh.ch) HTA, Biel: **Grundlagen der H₂-Reformat-zumischung am Ottomotor**
- [31] K. Boulouchos (kostas.boulouchos@ethz.ch), LAV/ETH, Zürich: **Industrietaugliche Lichtwellenleiter-Messkette zur Bestimmung der Russmenge, der Russtemperatur und des Zündverzugs im Verbrennungsmotor**
- [32] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al., PSI, Villigen: **Advanced Zero Emission Power (AZEP)**, (First Year Scientific Report of PSI in the EU-Projekt AZEP), (ENK6-CT-2001-0051).
- [33] T. Kaiser (tony.kaiser@power.alstom.com) et al., Alstom Power Technology Center, Baden: **TARGET: The Influence of Tar Composition and Concentration on Fouling, Emission and Efficiency of Micro and Small scale Gas Turbines** (ENK5-2000-00313).

- [34] T. Kaiser (tony.kaiser@power.alstom.com) et al., Alstom Power Technology Center, Baden: **AD700-2: Development of an Advanced(700°C) PowerPaint II** (ENK6-CT-2001-00xy)
- [35] T. Kaiser (tony.kaiser@power.alstom.com) et al., Alstom Power Technology Center, Baden: **CAME-GT: Thematic Network for Cleaner and More Efficient Gas Turbines** (ENK5-CT-2001-2006)

Referenzen

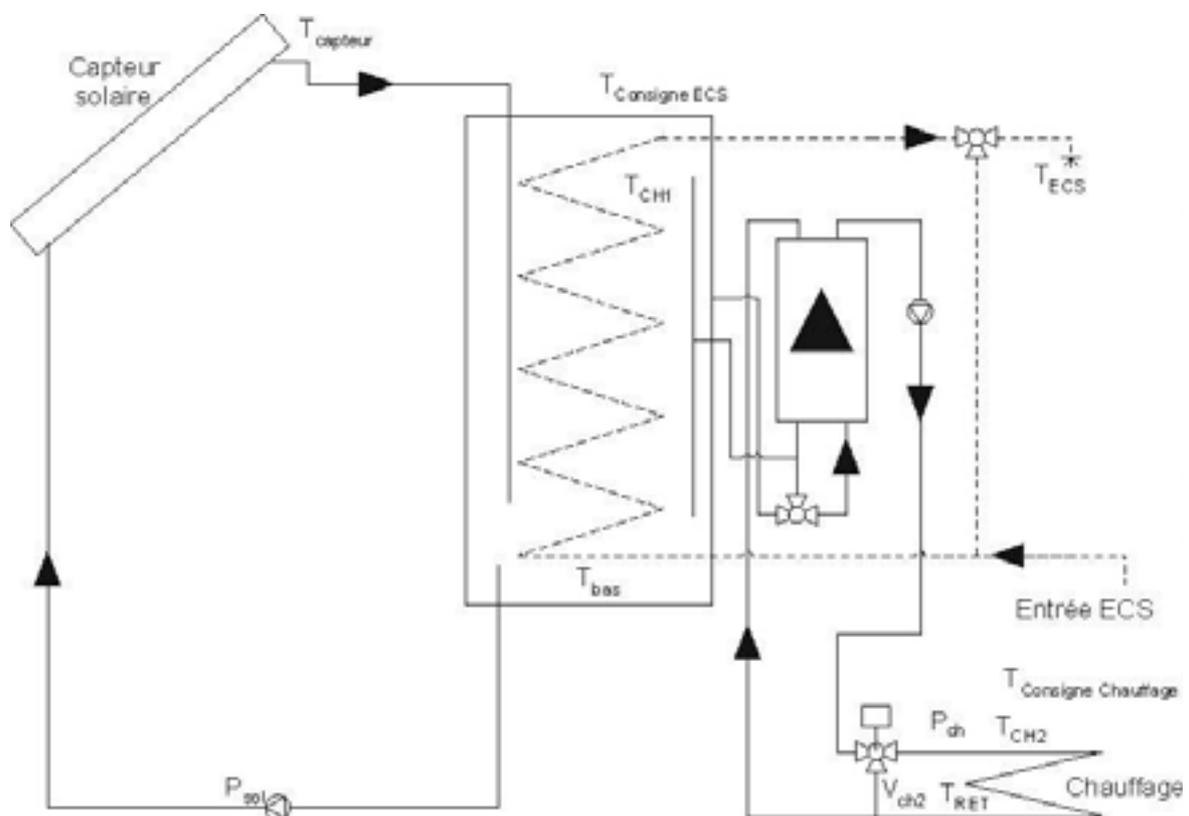
- [36] T. Koch, **Numerischer Beitrag zur Charakterisierung und Vorausberechnung in einem direkteingspritzten strahlgeführten Ottomotor**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14937, 2002.
- [37] K. Schänzlin, **Experimenteller Beitrag zur Charakterisierung der Gemischbildung und Verbrennung in einem direkteingspritzten strahlgeführten Ottomotor**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14939, 2002.
- [38] L. Demiraydin, **Numerical Investigation of Turbulent Nonpremixed Methane-Air Flames**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14947, 2002.
- [39] N. Tylli, **Induced global unsteadiness and sidewall effects in a backward-facing step flow: Experiments and numerical simulation**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14913, 2002.
- [40] K. Herrmann, **Strömung, Flammencharakterisierung und Stickoxid-Bildung in turbulenten Vormischflammen**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14952, 2002.
- [41] S. Kunte, **Untersuchungen zum Einfluss von Brennstoffstruktur und -sauerstoffgehalt auf die Russbildung und -oxidation in laminaren Diffusionsflammen**, Dissertation ETH Zürich Nr. 15003, 2003.
- [42] B. Schneider, **Experimentelle Untersuchungen zu Spraystruktur in transienten, verdampfenden und nicht verdampfenden Brennstoffstrahlen unter Hochdruck**, Dissertation ETH Zürich, 2003.
- [43] Ch. Appel, **Katalytisch stabilisierte Verbrennung von Wasserstoff-Luft-Gemischen über Platin in laminaren und turbulenten Kanalströmungen**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14642, 2002.
- [44] C. Schär, **Control of the Urea SCR Catalytic Converter System for a Heavy Duty Mobile Diesel Application**, Dissertation ETH Zürich Nr. 15004, 2003.
- [45] G. Madia, **Measures to Enhance the NOx Conversion in Urea-SCR Systems for Automotive applications**, Dissertation ETH Zürich, 2002.
- [46] Ch. Del Taglia, **Numerical Investigation of the Non-Reacting Unsteady Flow behind a Disk-Stabilized Burner with Large Blockage**, Dissertation ETH Zürich Nr. 14875, 2002.
- [47] M. Koebel et. al., **Recent Advances in the Development of Urea-SCR for Automotive applications**, SAE Transactions – Journal of Fuel&Lubricants 2001-01-3625.
- [48] W. E. Janach et. al., **Boosting of Turbocharger Dynamics: Simulation and Comparison of Different Solutions**, SAE 2002 03P-41.
- [49] C. E. Frouzakis et. al., **Transient Phenomena During Diffusion/Edge Flame Transitions in an Opposed-Jet Hydrogen/air Burner**, Proc. Comb. Inst., volume 29, 2002.
- [50] C. E. Frouzakis et. al., **From Diffusion to Premixed Flames in an H₂/Air Opposed-Jet Burner: The Role of Edge Flames**, Combustion and Flame, volume 130:171-184 (2002).
- [51] G. B. Dummond, Ed., **XXIII Task-Leaders-Meeting**, Proc. IEA-Conf. , Trondheim, Juni 2002.
- [52] A. Mayer, TTM (ttm.a.mayer@bluewin.ch), Ed., Proc. 6th ETH-Conference on Nanoparticle-Measurements, October 2002.
- [53] A. Hintermann, **Forschungsprogramm Feuerung&Verbrennung 2000-2003**.
- [54] BFE-**Internetseite des Forschungsprogramms** <http://www.feuerung-verbrennung.ch/fe>, Rubrik *Berichte*

SOLAIRE ACTIF : CHALEUR ET STOCKAGE DE CHALEUR

Rapport de synthèse 2002 pour le programme de recherche et les programmes P+D

Jean-Christophe Hadorn; Pierre Renaud

jchadorn@baseconsultants.com info@planair.ch



Système solaire combiné «dream system» avec une chaudière externe

L'étude de différents systèmes a permis d'améliorer sensiblement le taux de couverture solaire et de concevoir de nouveaux schémas dans le but d'améliorer encore l'efficacité globale du captage de l'énergie solaire. Source : École d'Ingénieurs du Canton de Vaud (EIVD).

Centres de gravité du programme et buts fixés

Le solaire thermique a connu une forte croissance entre 1990 et 1999. Depuis, la croissance s'est estompée, surtout pour les capteurs non vitrés. Notre programme a soutenu le développement des applications de toiture solaire à absorbeurs non vitrés depuis 1990 environ, et plusieurs grands projets ont vu le jour avant 2000. Les ventes de capteurs plans vitrés résistent mieux, mais le marché est difficile, car hésitant. Cela est également observé chez nos voisins champions du solaire, l'Autriche, avec 20 m² de capteurs pour 1'000 habitants et l'Allemagne (7 m²) (Suisse, 3.8 m²). La cause est avant tout le fait que le solaire reste un marché de niche et n'arrive pas à pénétrer en masse encore. Cela renforce notre vision des développements à effectuer dans notre programme :

- La qualité : durabilité des matériaux et fiabilité des systèmes, pour accroître la crédibilité du solaire.
- L'industrialisation : développement et standardisation de systèmes optimisés, pour chauffage et eau chaude, notre marché principal, pour diminuer les coûts.
- La recherche de meilleures solutions pour le stockage de chaleur, point central du solaire thermique.
- Le développement d'un capteur à concentration et d'une unité à cycle organique pour la production d'électricité par voie thermique.

Pour atteindre ses objectifs, le programme «Solaire actif : chaleur et stockage de chaleur» a été organisé en 2002 autour des axes suivants [23, 24]:

1. **Composants de l'industrie solaire** : améliorer la connaissance scientifique des capteurs solaires thermiques et des matériaux. Cela permet de disposer de connaissances fondamentales pour concevoir des systèmes et offrir un niveau élevé de qualité de conseils aux industries qui ne peuvent pas avoir de plate-forme de recherche propre (mission de support à l'industrie).

2. **Systèmes standardisés** : rechercher les meilleures combinaisons de composants pour les systèmes combinés chauffage et eau chaude de maisons individuelles, avec une participation à la Tâche 26 du programme «*Solar Heating and Cooling (SH&C)*» de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie). La mission est de réaliser le meilleur système combiné possible à un prix raisonnable, en observant les réalisations existantes sur le marché, et en les analysant, par mesure et simulation.

3. **Solaire à concentration** : la mini-centrale solaire thermique «SPS» de 10 kW électriques a fonctionné pour la première fois en 2001. Le but 2002 était de revoir la conception du capteur et de l'unité de production afin de la rendre plus compacte et plus fiable.

4. **Stockage saisonnier de chaleur** : rechercher en Suisse un projet de construction d'ampleur suffisante pour un stock saisonnier diffusif. La

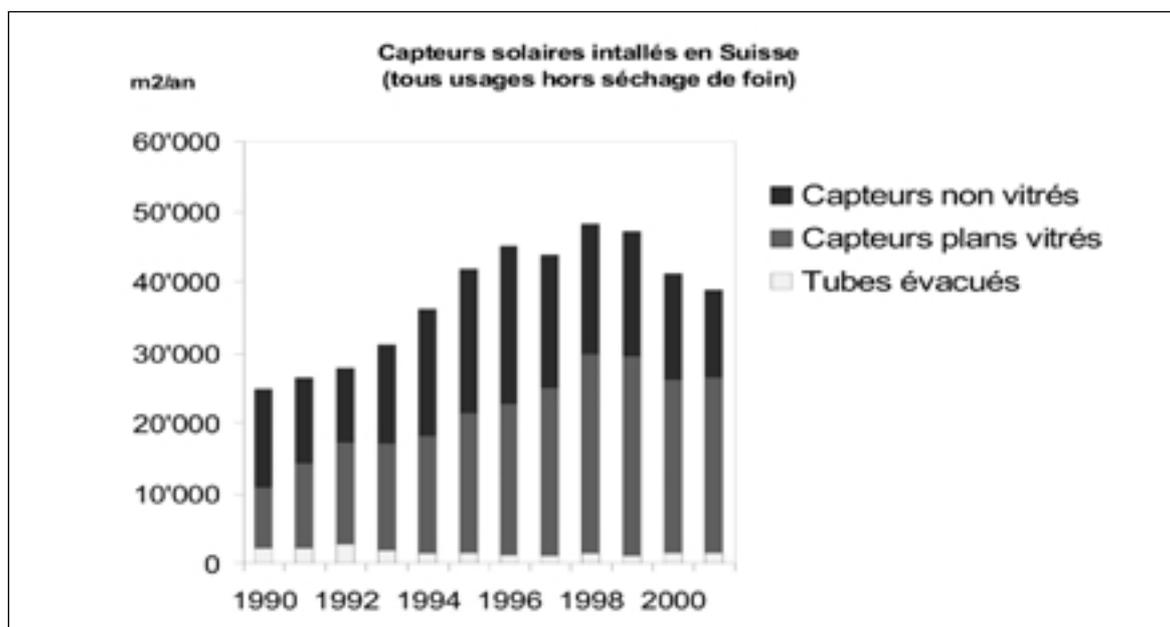


Figure 1 : Évolution des m² de capteurs solaires thermiques installés en Suisse depuis 1990 (Source SOFAS, 2002)

stratégie de faire une pause dans la recherche scientifique et de lancer une action de promotion s'est avérée payante.

5. **Stockage du futur** : le stockage saisonnier nécessite des gros projets. En Suisse, le marché du solaire est avant tout celui de la villa individuelle. Les installations solaires ne peuvent réaliser plus de 50% des besoins sans un stock d'eau de taille importante. Il faut investiguer les possibilités de réduire le volume tout en recherchant le 100% solaire. D'autres matériaux que l'eau doivent être (re)travaillés.

Le budget des programmes de recherche solaire est faible en regard des besoins et de la promesse que tout le monde voit à juste titre dans l'énergie

solaire. Nous devons être très attentif à investir nos moyens principalement dans des projets à débouchés rapides et maintenir notre focalisation principale sur les systèmes combinés, demandés par le marché. Ceci ne permet pas de faire de la recherche de base très poussée, ce qui est regrettable pour attirer les meilleurs chercheurs et développer une technologie de pointe en Suisse. Néanmoins grâce à la qualité des équipes que nous avons (pas plus de 15 personnes en tout), les résultats atteints sont excellents par rapport à ce que font d'autres pays voisins.

Notre programme 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 2002

COMPOSANTS DE LA TECHNIQUE SOLAIRE

Capteurs solaires thermiques et matériaux

Les travaux de ce secteur représentent 50% des moyens du programme. Ils sont concentrés sur le pôle de compétences du SPF à Rapperswil. En 2002 nous avons poursuivi les développements au SPF et réalisé les travaux suivants [1, 2, 3, 4] :

1. **Mesure des caractéristiques et test de qualité des capteurs solaires** : plus de 100 capteurs à eau ont été testés en 2002, en provenance principalement de la Suisse, mais aussi d'Allemagne, d'Autriche, d'Australie et de Chine. Les capteurs des fabricants expérimentés sont de plus en plus performants au cours des ans. Les procédures de mesure ont été améliorées encore en 2002 pour permettre de diminuer la durée d'un test. Le maintien des infrastructures de mesures et leur modernisation permanente (*hardware* et *software*) est essentiel pour assurer la rapidité et la qualité des mesures gages de l'amélioration des performances. Un banc d'essai pour les capteurs sans glycol, un futur axe en Suisse, a été monté.
2. Développement d'un **capteur à tube sous vide** en étroite collaboration avec l'industrie, en utilisant un logiciel de *design* optique de haut niveau. Les performances de ce capteur sont parmi les meilleurs jamais mesurés au SPF.



Figure 2 : test du capteur à tubes sous vide d'un type nouveau développé par le SPF

3. Le SPF a été **accrédité** selon la norme ISO 17025 comme «Laboratoire de tests pour les capteurs solaires thermiques et leurs composants » par le metas/sas. La norme EN 12975-1 et 2 est entrée en vigueur en 2002 et le SPF la respecte, ce qui n'est pas le cas de certains laboratoires en Europe. Un *round-test* des laboratoires européens est en cours sur une base volontariste.
4. Les différences entre mesures faites en soleil naturel et en soleil **artificiel** ont été expliquées et les raisons publiées lors du congrès ISES 2002 [25].

5. Le SPF s'est engagé dans le label européen «**Solar Keymark**» qui devrait apparaître en 2003 pour certifier les capteurs de qualité. Ce label aura une influence certaine sur les tests de capteurs en 2003 par la rigueur des exigences pour les industriels et aussi pour les laboratoires de tests. Le SPF fait aussi partie d'un groupe reconnu par le DIN-CERTCO qui rassemble des labos allemands et autrichiens spécialisés dans l'énergie solaire.
6. Le **CD-ROM SPF-Info CD 2002** a été publié avec tous les capteurs et couvertures testés au SPF. C'est l'outil principal du transfert de connaissances du SPF vers le marché. 8'000 exemplaires ont été distribués en Europe !
7. La participation à la Tâche 27 «**Performance of solar façade components**» du programme **Solar Heating and Cooling (SH&C)** de l'AIE, a été assurée. Le SPF a développé un appareil pour tester l'effet de la condensation sur des échantillons de matériaux transparents avec couche mince. La durabilité des matériaux est au centre de la contribution du SPF dans la Tâche et dans le solaire en général.
8. Le groupe MSTC («*Materials in Solar Thermal Collectors*») va publier chez Elsevier un **livre** «*Performance and durability assessment of optical materials for solar thermal systems*» dans lequel le SPF a écrit 4 chapitres.
9. Des tests sur des **bancs spéciaux** sont accomplis pour l'industrie solaire : qualification du transfert de chaleur d'un absorbeur (mesure de F'), tenue de la couche sélective, dégazage des matériaux d'un capteur, qualité des soudures de tubes sur les absorbeurs, connexion entre capteurs en toiture. Ces tests débouchent sur des conseils permettant d'améliorer la qualité des capteurs et leur durabilité.
10. Un stand de **test des cuves** de stockage a été mis au point dans le cadre des essais de systèmes combinés (voir ci-dessous). La normalisation des tests de stock est en cours en Europe.
11. La définition d'une qualité «**Solarglas**» pour le verre solaire est achevée, après des discussions au niveau européen, et un premier verre a pu être certifié durant l'année. Tous les verres des capteurs devraient être qualifiés de «**Solarglas**» dans le futur label «**Solar Keymark**» qui sera introduit.

Nouveaux matériaux

Un développement original a débuté au LESO-EPFL. Il concerne les matériaux des capteurs so-

laires et la possibilité de réaliser des éléments s'intégrant plus aisément dans toute architecture. Ce projet de haut niveau scientifique ne peut être décrit pour le moment en détail. Il fait l'objet d'une recherche en brevet. Il devrait déboucher, en cas de succès, en 2003 sur une poursuite industrielle [10].

Outils de simulation

Les outils de simulation sont nécessaires aux ingénieurs pour effectuer des projets adaptés à une demande en chaleur et à un lieu. Depuis 10 ans nous avons bâti au SPF le programme *Polysun* qui devient un standard européen, en combinaison avec l'autre logiciel que nous avons soutenu, *Meteonorm*, base de données solaires horaires. En 2002 :

1. La version de **Polysun 3.3.5** a été distribuée via le CD-ROM SPF Info. Elle contient la possibilité de simuler une installation supplémentaire (1 stock avec 2 échangeurs solaires) et les menus sont désormais en 9 langues pour suivre la demande. *Polysun* a élargi le nombre de distributeurs avec le Danemark et l'Italie.
2. En collaboration avec Meteotest, l'accès aux données météorologiques mondiales a été réglé et simplifié pour les utilisateurs de *Polysun* : une version spéciale de *Meteonorm*, dénommée *Meteosun 1.0*, a été développée et est mise en vente.
3. Des versions spéciales de *Polysun* ont été développées pour certains clients qui désirent pouvoir distribuer une version figée du logiciel sur leurs produits particuliers. Cela montre la qualité du logiciel et sa reconnaissance dans l'industrie, et permet un financement complémentaire pour le SPF.
4. Le développement de la version 4 de *Polysun* est avancé. Un prototype en Java a été réalisé. Le modèle de données et la conception sont au *top* de la programmation actuelle et permettront une solution pérenne et totalement compatible avec un navigateur Web. *Polysun* sera entièrement réécrit avec ces outils modernes en 2003.
5. Le site internet du SPF reçoit 100 à 150 visiteurs par jour ! De plus, c'est un outil fantastique de communication avec le marché. Le site a été entièrement revu pour permettre de constituer une plaquette imprimable. Les mesures réalisées au SPF sont toutes à disposition sur le site.
6. Le serveur interne du SPF, portant toutes les mesures, a été mis à jour en technologie Raid5.

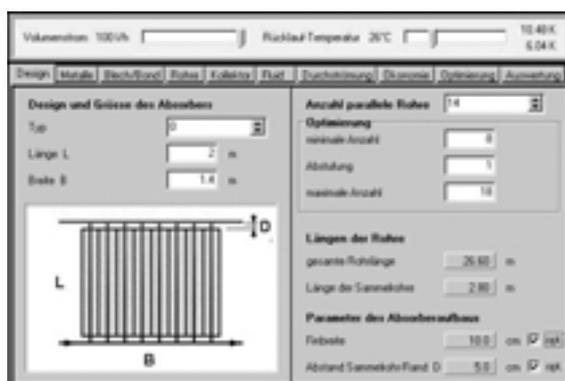


Figure 3 : le logiciel Absorber Master du SPF permet de dimensionner un absorbeur de capteur solaire thermique en maximisant ses performances de transfert de chaleur (version 1.2)

Dissémination des données météorologiques pour le projet solaire

Meteotest participe pour la Suisse au projet européen SODA «Integration and exploitation of networked solar radiation Databases for environment monitoring» dans le programme IST «Société de l'Information conviviale» du 5^e Programme-cadre de l'UE. La mise en réseau de données météorologiques est un concept nouveau et le prototype de 2002 fonctionne plus aisément que le précédent [9]. Ce type de fonctionnalités via Internet pourrait remplacer la distribution de CD à terme, mais les problèmes du paiement des données restent à résoudre.

SYSTÈMES ET INSTALLATIONS SOLAIRES POUR LE BÂTIMENT

Systèmes combinés : mesures et optimisation

Les systèmes combinés «eau chaude et chauffage» sont ceux qui nécessitent le plus d'attention actuellement. Il y a une demande forte du marché, et une offre qui abonde, mais des niveaux de qualité et d'optimisation hétérogènes.

1. Des **kits solaires de préparation d'eau chaude sanitaire** pour une maison familiale sont testés depuis plusieurs années au SPF. En 2002, 5 kits commerciaux ont été évalués [2].
2. La mise au point et l'utilisation du banc d'essai des **systèmes, dits combinés**, ont été la grande mission du SPF en 2002. Le banc monté depuis 2 ans est très performant et le premier du genre en Europe et sans doute dans le monde. Il permet de simuler les apports solaires et la demande en chaleur d'un bâtiment pour un système combiné

comprenant une cuve de stockage, l'échange solaire, la distribution, la régulation et surtout l'appoint réel. La mesure est délicate, car les différences de température sont faibles et les consommations de gaz peuvent être minimales durant un intervalle de temps. En outre, un modèle TRNSYS de l'installation tourne parallèlement aux mesures de manière à obtenir un calage en temps réel du modèle de l'installation. Cela permet de caractériser les composants et de prédire la performance annuelle avec un test assez rapide. En outre, l'optimisation devient possible, car le modèle de l'installation peut être utilisé pour des analyses de sensibilité ou de modifications. Six installations ont pu être mesurées en 2002 avec la séquence de 12 jours. Les résultats montrent la difficulté de la mesure : les installations ne fonctionnent pas toujours comme les fabricants le pensent et peuvent avoir des instabilités de réglage ! La mesure se transforme alors en diagnostic-conseil ; ce qui alourdit la mission, mais est utile au marché ! Une campagne de tests «Kombi-Kompakt+» a été proposée à tous les fabricants suisses avec une participation financière. L'écho a été bon et ce seront en tout plus de 10 systèmes qui vont être testés.

3. La **Tâche 26 «Solar Combisystems» du programme SH&C de l'AIE**, initiée en 1999, s'est terminée en 2002. Elle a permis la mise au point d'une méthode de test des systèmes combinés, d'une nouvelle méthode d'évaluation comparative des installations solaires, et de modèles TRNSYS de 10 installations standards en Europe. L'ensemble des travaux sera présenté dans un livre de référence, à paraître en 2003 chez James & James. Six «industry workshop» ont permis, au cours de la Tâche, d'informer les professionnels du solaire des avancées. Les systèmes mesurés et simulés ont été améliorés grâce à la modélisation. Les industriels peuvent également évaluer les dispositifs qui fonctionnent bien dans d'autres systèmes. Cette Tâche et ses retombées contribueront à faire mieux connaître les clés d'un système combiné, à standardiser les solutions et à comparer leurs avantages respectifs. Trois équipes suisses participent à cette Tâche 26 : Suter Consulting, dirigeant la sous-tâche A qui réalise la comparaison des systèmes combinés, et qui participe à la rédaction du document de synthèse de la Tâche 26 qui s'intitulera «Solar Heating Systems for Homes – A Design Handbook for Solar Combisystems» [8], l'équipe du SPF de Rapperswil qui s'est concentrée sur les méthodes de tests

au banc d'essai des systèmes combinés [2], et l'équipe EPFL– HES Yverdon qui a analysé un système combiné du marché *in situ* et en labo [5a, 5b].

Voici les résultats obtenus en 2002 :

- Les travaux réalisés à Yverdon par le LESBAT ont permis d'apporter des améliorations notables à la performance d'une installation «Arpège» par différentes mesures dont les bénéfiques ont été prédits pas simulation. De nombreuses simulations ont été effectuées permettant une augmentation du *fsav* («fractional energy savings», nouvelle définition) de 5 points, à 34,2%, pour le cas de base (climat de Zürich, 12 m² de capteurs plans, consommation en chaude sanitaire de 8,28 kWh/d et demande en chauffage de 60 kWh/m² a). On touche à la limite des possibilités d'amélioration de l'installation dans sa configuration actuelle. De 1999 à 2001, on a pu gagner 17% sur le *fsav* par simulation. Les modifications apportées ont été introduites chez le fabricant, car elles étaient peu coûteuses et engendraient des gains importants. Globalement, parmi les systèmes évalués en détail dans le cadre de la Tâche 26 du programme SH&C de l'AIE, le système combiné «Arpège» se situe en bonne position. Le critère énergétique était important, mais les critères de masse de matière mise en œuvre également. Du fait de ses bonnes performances énergétiques, le «temps de remboursement énergétique» d'«Arpège» est plus court que celui de systèmes qui présentent une masse et une énergie grise plus faibles *a priori*. Nous remercions la société Agena d'avoir compris le bénéfice qu'elle pouvait retirer de travailler avec la recherche suisse dans le cadre de cette Tâche internationale. Le projet se termine en début 2003 par la génération de systèmes combinés «idéaux» et leur simulation. Il est attendu une valeur d'économie du *fsav* dépassant 40% pour une villa-type, avec un système n'ayant que 12 m² de capteurs, et conçu en empruntant à différents systèmes en Europe leurs points positifs repérés et analysés.
- La commande prédictive développée par l'institut d'automatique (IA) de l'EPF de Lausanne prend en compte les prévisions météorologiques de l'Institut Suisse de Météorologie, accessibles via Internet, les caractéristiques de l'installation solaire et celles du bâtiment. Le bâtiment a été simulé par 2 nœuds. La stratégie de commande avancée, développée dans le cadre de ce projet, s'est avérée très performante. Une réduction de plus de 15% de la consommation de gaz a été observée en simulation, grâce à la commande optimale, et de 10% lors des premières mesures en labo. Cette validation expérimentale est en cours à Yverdon à l'aide des tout nouveaux modules *FieldPoint* de National Instruments, qui portent l'algorithme de commande optimal. Le programme réalisant la stratégie consiste donc en un seul VI («virtual instrument», nom donné à une application LabVIEW).

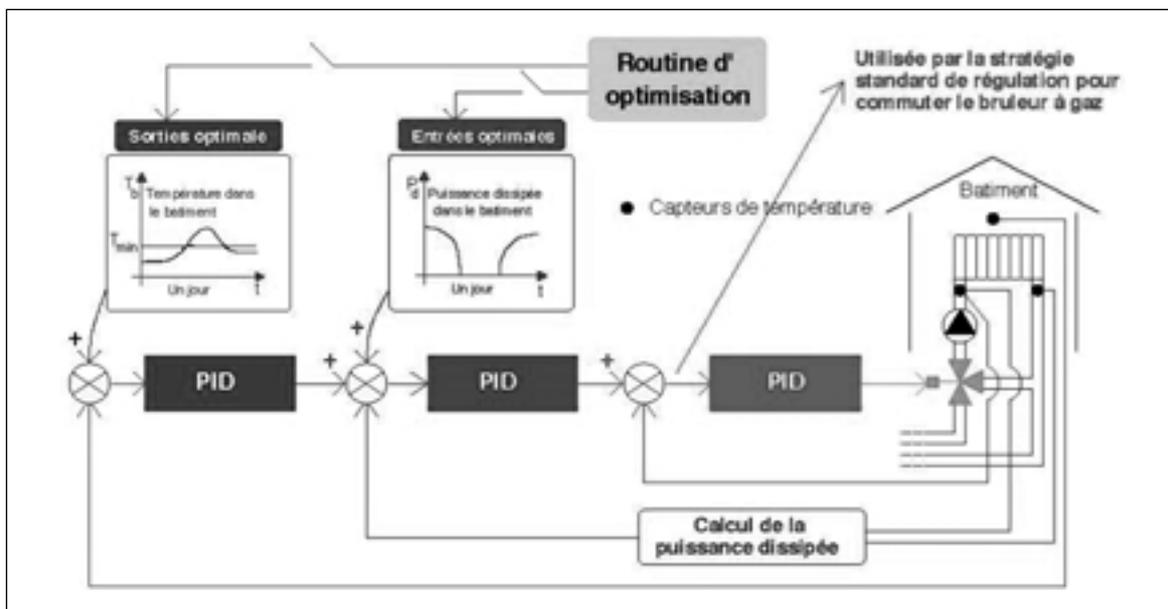


Figure 4 : schéma de fonctionnement de la commande optimale développée pour un système combiné [27]



Figure 5 : le concentrateur extra-plat CEP de près de 10 mètres du projet SPS peut atteindre une efficacité de 50%

Les routines d'optimisation, d'identification automatique des paramètres du bâtiment, ainsi que les trois boucles PID ont été écrites en langage C et incorporées au VI principal sous la forme d'une DLL («*Dynamically Linked Library*»). L'implantation d'une commande avancée, incluant une procédure automatique d'estimation du modèle du bâtiment sur du matériel industriel générique de contrôle de processus, a constitué en 2002 l'ultime étape pour l'industrialisation. Son exploitation ne se limite d'ailleurs pas aux installations solaires. La stratégie développée sera testée et déployée sur des bâtiments publics dont la gestion du chauffage et de l'eau chaude sanitaire est assurée par les services industriels de la ville de Lausanne. La recherche en matière de commande optimale pour le solaire thermique est débutante en Europe, et la Suisse a été le premier pays à s'y intéresser, notamment avec le LESO et l'IA de l'EPFL. L'implantation de ce type de commandes dans un régulateur bon marché et fiable reste un défi. Une collaboration avec un industriel a été initiée en ce sens.

PRODUCTION DE CHALEUR À HAUTE TEMPÉRATURE ET PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Centrale solaire pilote «Solar Power System» (SPS) de 10 kW_{el} [6,7,28, 29, 30, 31, 32]

En 2001, la centrale solaire pilote a produit des kWh électriques solaires. Un certain nombre d'améliorations ont été envisagées suite aux résultats obtenus *in situ*, tant pour le capteur solaire que pour l'unité de production d'électricité. En 2002, le *design* du CEP capteur solaire extra-plat a été revu par Cogener, afin de pouvoir disposer d'un collecteur linéaire indépendant du producteur SOLEL, à cause du prix et de la fragilité du tube du collecteur Solel. Le défi est important : réaliser une ligne continue de près de 10 m, avec un facteur de concentration plus important que celui du tube précédent. Cela pour atteindre des températures dépassant 160 °C, nécessaires pour

améliorer l'efficacité thermodynamique de la centrale. La solution conçue comprend un absorbeur sélectif Sunstrip de Technoterm, Suède, placé dans un tube en verre de 40 mm (Ø intérieur) et éclairé par un réflecteur à profil CPC en inox poli miroir de 1 mm d'épaisseur. Le montage de l'ensemble est délicat et a dû faire l'objet de plusieurs tentatives avec améliorations successives. Les tests sur le CEP du nouveau tube n'ont pas pu être effectués durant l'été 2002 suite à des retards de fournisseurs et d'organisation.

Cogener a ouvert en 2002 des perspectives d'utilisation du capteur CEP. Les contacts en cours sont prometteurs pour une fourniture de plusieurs centaines de m² en 2004.

En ce qui concerne l'unité de production d'électricité (ORC, «*Organic Rankine Cycle*») développée au LENI-EPFL, les objectifs principaux pour 2002 à 2004 sont d'accroître le rendement, de réduire l'encombrement et d'améliorer les points éventuels de manque de fiabilité observés en 2000 et 2001. Le nouveau tube collecteur sous vide, constitué d'un capteur CPC, a remplacé la ligne Ouest de la centrale en fin 2002. Le débit maximal du nouveau collecteur est faible du fait du diamètre du tube Sunstrip, ce qui a poussé le LENI à choisir une solution d'évaporation partielle de l'eau directement dans le collecteur pour bénéficier de la chaleur à haute température (170 °C pour 8 bar).

Les tests du nouveau collecteur ne pourront se faire qu'en 2003 faute de soleil en fin d'année. Une nouvelle enveloppe pour la turbine *scroll* ManEurop SZ 125S4RA a été fabriquée et testée. Le standard de résistance est plus élevé que l'original. Cette enveloppe est démontable du côté haute pression aussi bien que du côté basse pression, ce qui permet d'observer la lubrification de la turbine tout en permettant (dans le futur) la possibilité d'accouplement d'une pompe en bout d'arbre, objectif ultime pour un *design* compact. Pour améliorer le mauvais rendement de l'évaporateur – condenseur à plaques situé entre les cycles haut et bas –, l'idée d'un évaporateur-con-

denseur basé sur la technique de films tombants a été avancée. Un logiciel pour dimensionner cet échangeur a été développé par le Laboratoire de transfert de chaleur et de masse de l'EPFL. L'étude du comportement transitoire des turbines *scroll* a montré qu'un pic de courant n'est pas évitable lors du démarrage de la centrale.

Les travaux futurs concernent les tests de performances et de pilotage des nouveaux collecteurs à évaporation directe, l'analyse de l'huile sur le rendement des échangeurs, l'essai d'un nouveau réfrigérant, le R245fa, pour remplacer le R123, le test éventuel d'un nouveau tube collecteur sans soudures, l'étude de l'optique du capteur CEP par *Ray Tracing*, et enfin la conception d'un nouvel échangeur. Les développements à faire sont importants et des sources de financement complémentaires (industrie) seraient bienvenues.

STOCKAGE SAISONNIER DE CHALEUR

Optimisation d'installation et outils de simulation

Les mesures du projet pilote **Wollerau** (36 sondes de 120 m) n'ont pas pu être exploitées au SUPSI à Canobbio, comme prévu en 2002, faute de disponibilité. Un modèle de l'installation est terminé et sera utilisé en 2003 [13]. Le projet permettra de comprendre le fonctionnement de l'installation pour apporter des recommandations aux projecteurs de stock saisonnier chaud-froid.

Pour la même raison, la valorisation des mesures du projet **Serso**, pont sur autoroute à Därlingen chauffé en hiver par un stock souterrain de 46'000 m³ chargé par la chaussée en été, n'ont pu encore être exploitées [14].

Nouveau procédé de stockage

Le CUEPE à l'Université de Genève a découvert [36], une propriété intéressante de l'équation de la chaleur. Il est proposé un nouveau dimensionnement pour un stockage journalier ou saisonnier permettant de minimiser l'amortissement de l'onde de charge, avec un déphasage «sur mesure» de 12 h (intérêt pour le rafraîchissement) ou de 6 mois ! L'idée mathématiquement démontrée, et mise en œuvre sur un test expérimental simple, doit encore être testée dans des conditions d'adiabaticité non parfaites et dans des géométries intéressantes pour les bâtiments. Les buts du projet sont l'approfondissement théorique du concept de déphasage thermique à amortissement quasi-nul, le développement d'un ou deux prototypes pour le rafraîchissement par déphasage journalier, la mise sur pied d'un projet d'installation pilote. Un outil de dimensionnement a été réalisé en 2002. Un brevet pourrait découler de cette recherche originale [15].

Projets pilote et de démonstration

La réalisation du grand projet de la **SUVA** à Root (Lucerne) est en bonne voie [18]. Les bâtiments sont en voie d'achèvement, le stock saisonnier de 360'000 m³ est construit, la pompe à chaleur et le stock tampon sont installés, l'installation solaire et les connexions sont en cours. L'installation complète devrait être achevée en avril 2003. Les mesures sont planifiées et l'installation sera suivie durant 2 cycles annuels complets.

Un des objectifs du programme P+D «Stockage» depuis 3 ans est de réaliser en Suisse un premier projet pilote de stockage diffusif analogue à celui de la SUVA, mais **sans pompe à chaleur**. Un tel

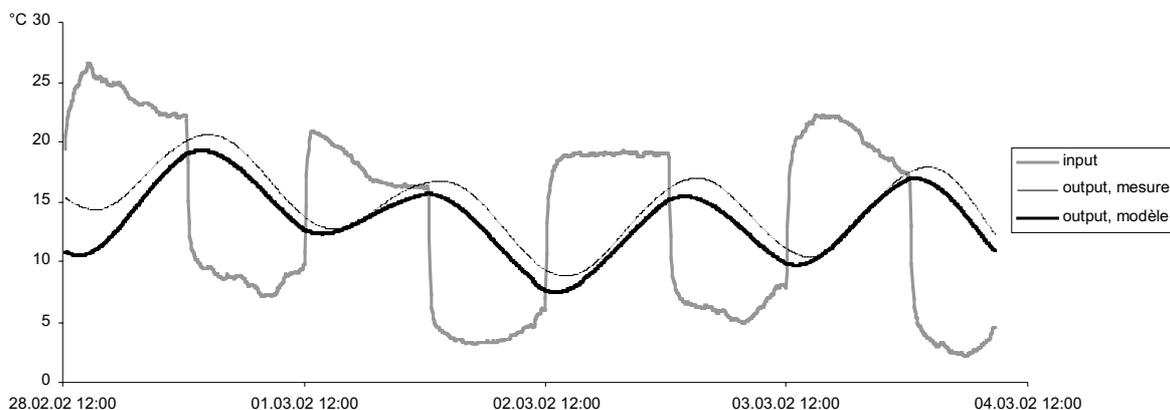


Figure 6 : la découverte théorique au CUEPE a été confirmée expérimentalement : on observe bien par la mesure le déphasage à amortissement quasi nul d'une fréquence journalière «carrée».

stock chargé en été par des capteurs solaires vitrés fonctionnerait entre 20 et 60 °C et permettrait d'atteindre des taux de couverture solaire de plus de 50% dans des quartiers d'habitation de plus de 100 logements. Le groupe d'étude de l'HES Winterthur a ouvert la porte de deux projets avec la ville de Zürich, attachée à réaliser des projets économes en énergie. Le premier projet, Heuried, de 100 logements en rénovation au standard Minergie par la ville, a été évalué et a dû être abandonné du fait de la configuration des toitures de bâtiments, défavorables à de grandes surfaces de toiture. Un deuxième projet, Heumatt, de 140 logements qui seront rénovés également au standard Minergie, a été évalué. Un projet solaire et stockage s'est avéré possible. La ville de Zürich lancera au début 2003 un concours général pour la rénovation et pour le solaire avec stockage saisonnier. L'affaire est difficile, car les bureaux d'étude ou les entreprises ne sont pas familières avec la technologie. Le concours devrait réunir 3 à 4 entreprises générales, qui ont accès à une journée de discussions avec le ZHW pour finaliser leur offre. Après le choix, un groupe de soutien à l'entreprise générale sera mis sur pied pour aider à résoudre les détails techniques, si nécessaire. Cette manière de fonctionner est nouvelle. L'état de ce projet [12] a été présentée dans *ENET News* en 2002 pour promouvoir le concept [37].

Une solution nouvelle pour le chauffage et le rafraîchissement a été réalisée par la société Ecoconfort (Préverenges, VD) à Satigny (GE). Le projet **CostEAU**, composé d'un collecteur terrestre horizontal non pas à air, mais à eau, utilisé habituellement pour les pompes à chaleur, de coût réduit à l'investissement et à l'exploitation (consommation réduite d'électricité pour le circulateur), est terminé. Les résultats sont favorables au concept. Le rapport final est attendu pour le début 2003 [22].

Plusieurs projets pilotes qui arrivaient en fin de contrat de mesures n'ont toujours pas fait l'objet de rapports finaux de la part des requérants, et ce malgré nos demandes répétées [19, 20, 21]. Les projets seront clos en 2003.

STOCKAGE DENSE DE CHALEUR POUR L'HABITAT

Stockage par procédé de sorption

Dans le projet «stockage dense», le SPF à Winterthur essaie de réaliser un stock de chaleur solaire trois fois plus dense que l'eau. En 2002, après analyse des matériaux, la zéolithe 13X a été écartée, et un prototype de stock en silicagel 720, d'une granulométrie de 1 à 3 mm, en circuit

fermé, a été testé. Le module de sorption sous vide comprend 35 litres de matériel, et la cuve d'eau 24 litres d'eau. Le chauffage du matériel est assuré par un circuit de glycol chauffé par une résistance électrique (côté solaire). Un échangeur à ailettes en spirale permet d'introduire la chaleur. Une cuve à eau est reliée au module de sorption par une vanne de détente et est thermostatée pour prendre ou fournir de la chaleur. L'échangeur a été dimensionné à 1,8 m² et construit pour assurer le transfert de chaleur nécessaire entre le glycol et le matériel de stockage. L'ensemble de l'installation est sous vide et pose des problèmes délicats de tenue du vide et de mesures. Le silicagel a été chargé (désorption) par un circuit à 120 °C, mais n'a atteint que 45 °C. Les mesures ont montré une capacité de stockage de l'ordre de 86 kWh/m³. À 25 °C, la saturation du silicagel est de l'ordre de 20% d'eau en poids.



Figure 7 : Le module contenant le matériel de stockage et l'échangeur «solaire-stock» en spirale

La littérature donne une capacité de 150 kWh/m³ pour le silicagel. Cette valeur ne peut malheureusement pas être atteinte dans une installation réelle, compte tenu du fait qu'il faut apporter de l'énergie au niveau de la cuve à eau pour évaporer l'eau ; ce qui diminue d'autant la capacité de

stockage du système silicagel-eau. Cette énergie peut cependant être utilisée pour produire du froid en été. D'autres matériaux seront testés en 2003. Ce projet sera un de nos projets qui participera à la nouvelle Tâche 32 «**Advanced storage concepts for solar buildings**» du programme SH&C de l'AIE, qui va démarrer en juillet 2003 [11].

Stockage à moyenne température

Les cuiseurs solaires à concentration sont promus en Suisse par une jeune société de Neuchâtel (CNCS). Le problème du stockage se pose de manière aiguë : les cuiseurs sont utilisés pour la cuisson de crêpes lors de manifestations diverses en Suisse et ne peuvent satisfaire la demande dès que le soleil disparaît. Un stock journalier a été imaginé au CNCS pour cet usage. Après une recherche de différentes solutions, deux éléments de stockage de chaleur pour des cuiseurs solaires paraboliques à réglage automatique ont été fabriqués et testés. Le premier consiste en un bloc d'aluminium, il stocke la chaleur sensible. Le deuxième est rempli d'étain, il travaille avec la chaleur latente du changement de phase (solide-liquide). Les avantages observés du stockage de chaleur latente sont une plus grande partie efficacité de stockage (72% contre 58% pour le

premier stock) et le fait que l'élément a atteint rapidement sa température de travail. L'énergie stockée lors d'une journée ensoleillée a été suffisante pour cuisiner pour une famille le soir (1 kWh). Le prototype de stock sera amélioré par le CNCS en 2003, notamment en le plaçant de telle sorte qu'aucune manipulation du stock assez lourd ne soit nécessaire, et il sera incorporé dans une offre pour le marché des cuiseurs (exportation). Le coût du stock est cependant du même ordre de grandeur que celui du concentrateur, ce qui pourrait limiter sa distribution [17].

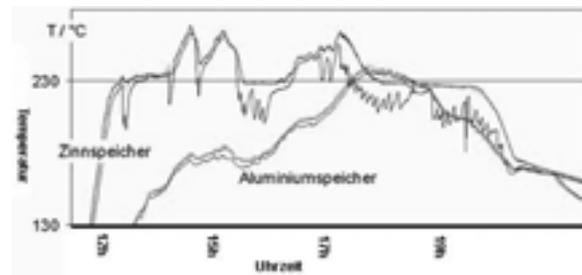


Figure 8 : durant une journée ensoleillée, les comportements des 2 stocks de cuiseur solaire sont bien différents. Le stock en étain s'est montré le plus efficace en se maintenant bien à 230 °C (!) après le coucher du soleil (mesure du CNCS le 2.08.2002 à Môtiers).

Collaboration nationale

Les pôles de compétences de notre programme sont les suivants : SPF pour les tests de matériaux, des capteurs, des stocks et de systèmes ; EPFL & HES-SO pour le contrôle optimal des systèmes ; LENI & Cogener pour le développement de la production d'électricité par voie thermique ; HES Winterthur & SUPSI Canobbio pour le stockage saisonnier diffusif. Ils se sont tous rencontrés à l'occasion de la première journée «**Solarthermie**» organisée à Rapperswil le 29 novembre 2002, avec plus de 100 participants de Suisse. Les axes de recherche du programme y ont été présentés.

La collaboration entre le SPF et «l'industrie solaire suisse» est toujours intense, et des industries de tout pays reconnaissent le savoir-faire du SPF et viennent le consulter. La gestion entre domaine public et domaine privé est délicate, car certains industriels financent en tout ou partie les recher-

ches qu'ils commandent. Il est essentiel que le SPF garde un contact étroit avec l'industrie pour maintenir sa qualité et ses connaissances, et il est souhaité que l'industrie puisse faire appel aux experts du SPF, en dehors des missions de base que notre programme peut financer.

La collaboration entre l'Institut d'automatique (IA) de l'EPF de Lausanne, le LESBAT à la HES d'Yverdon et une industrie (Agena) s'est prolongée et donne lieu à des transferts de chercheur vers l'industrie.

Dans le projet **SPS**, le laboratoire LENI de l'EPFL travaille avec le bureau d'ingénieur Cogener, situé sur le Parc scientifique de l'EPFL.

Le projet **CostEAU** a été une collaboration entre l'Université de Genève et l'entreprise Ecoconfort, concepteur de l'installation.

Collaboration internationale

Plusieurs travaux suisses ont été exposés à la grande conférence européenne **EUROSUN 2002** à Bologne.

Quatre groupes (SPF, IA-EPFL, LESBAT HES-SO, Suter consulting) ont participé très activement à la Tâche 26 «**Solar combisystems**» du programme SH&C (*Solar Heating and Cooling*) de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE). Cette Tâche, qui évalue, compare et optimise plus de 10 systèmes combinés du marché, s'est achevée en 2002. Les résultats intermédiaires ont été présentés au «*12th Symposium on Thermal Use of Solar Energy*», du 24 au 26 avril 2002, à Staffelstein, Allemagne. Des «*Industry workshop*» en liaison avec chaque meeting de la Tâche 26 ont été tenus sur

des sujets pointus concernant les composants des systèmes combinés. Une «*Industry newsletter*», distribuée dans toute l'Europe, a été éditée en 2002, cela afin de diffuser les connaissances acquises dans la Tâche directement aux fabricants d'installations standardisées.

Nous avons initié une nouvelle Tâche du programme SH&C de l'AIE, à savoir la Tâche 32 «**Advanced storage concepts for solar buildings**». La Tâche que nous avons conçue durant 2002 avec des partenaires allemand et hollandais a été acceptée en novembre 2002 par l'AIE, et nous préparons la participation des chercheurs de tous pays pour 2003.

Projets pilotes et de démonstration «Solaire actif – chaleur»

Les 21 projets en cours en 2002 répondent aux objectifs spécifiques du programme P+D : ce sont le transfert des résultats des activités de R+D, le test de nouveaux concepts, la démonstration et la dissémination des systèmes éprouvés, et la résolution de divers problèmes pratiques. L'objectif final consiste à accroître la fiabilité et la rentabilité du solaire thermique, à améliorer sa visibilité et à gagner la confiance des décideurs.

Installations de production d'eau chaude sanitaire

Cinq projets de démonstration de ce type se sont terminés en 2002. À **Neuchâtel** [38] une installation solaire (36 m², 2'250 litres, 380 kWh/m²) assure le préchauffage de l'eau sanitaire d'un bâtiment pour personnes âgées (70 pensionnaires dans 49 studios). L'excellente expérience réalisée avec cette installation a convaincu la Fondation des Établissements cantonaux pour personnes âgées de réaliser des installations sur ses deux autres bâtiments. À **Cugy** (VD) [40], une installation solaire (41 m² d'absorbants non vitrés, 2'500 litres, 103 kWh/m²) équipe les vestiaires des terrains de sport ; exploitée en *contracting*, cette installation fournit l'eau chaude sanitaire et un appoint au chauffage (chauffage en entre-saison, maintien hors gel en hiver). À **Prilly** [43], une installation solaire de 36 m² et 2'500 litres fournit, en *contracting*, 64% des besoins d'eau chaude sanitaire du nouvel EMS *Primeroche* (54 pensionnaires). Fruit d'une intense collaboration avec

l'architecte, cette installation se distingue par une parfaite intégration des capteurs, répartis en deux champs de 24 et 12 m² respectivement, en toiture du bâtiment. À **Ebikon** [44], un lotissement de douze habitations est alimenté en eau chaude sanitaire par une installation solaire centralisée (34 m² fonctionnant en *low-flow*, 2'200 litres), via un réseau local en étoile en matériau PE (polyéthylène). Ce réseau est également utilisé pour le chauffage des pièces inférieures par radiateurs, via un échangeur de chaleur (à l'étage, le chauffage des pièces est assuré par un poêle à bois). Cette particularité a nécessité plusieurs adaptations pour donner satisfaction. À **Regensdorf** [42], une entreprise active dans le développement de photos est alimentée en eau chaude par une installation solaire (168 m², 12'000 litres) ; la cantine d'entreprise sert 1'000 repas par jour. Le suivi des trois premières installations mentionnées et la mesure de leurs performances indiquent une tendance générale, lors de la définition du cahier des charges, à surévaluer les besoins d'eau chaude (jusqu'à un facteur 3), pouvant conduire à une rentabilité et une productivité d'énergie défavorables.

Dans le cadre de l'action **JugendSolarProjekt**, deux projets [52,53] ont démarré en 2002, l'un pour le Village d'Enfants Pestalozzi à **Trogen** (45 m² auto-construits), et l'autre dans une communauté rurale à **Cimalmotto** (75 m² auto-construits, pour eau chaude et chauffage, taux de couverture solaire élevé).



Figure 9 : capteurs solaires sur l'EMS Primeroche à Prilly : une intégration très réussie

Nouveaux concepts et composants

Un **concept hydraulique novateur** consistant à brancher le circuit des capteurs sur la boucle de circulation d'eau chaude, et dont la pré-étude s'est achevée en 2001 [59], est en voie de concrétisation sur un locatif à Bâle [55]. La réalisation et l'évaluation suivront en 2003. Le projet **FIIFA** [39], démarré en 1997, visait le développement et le test de capteurs intégrés en façade ventilée (la synergie avec la façade ventilée devant conduire à une réduction des coûts par rapport à des capteurs traditionnels). La difficulté de trouver un décideur enthousiaste pour la réalisation d'une installation pilote et la baisse de la pertinence, résultant de l'accumulation de retards dans l'exécution du projet, ont motivé l'arrêt de celui-ci avant son terme. Un *design* mécanique et hydraulique du capteur, adapté à la sous-construction de type *lckler*, ainsi que diverses recommandations organisationnelles et constructives sont à disposition des intéressés. La ventilation de la façade-capteurs, ainsi que les performances, restent à éprouver en pratique. Après les corrections de différentes faiblesses et l'instrumentation en vue des mesures, le suivi des performances de plusieurs **systèmes drain-back** (circuit capteur pouvant être vidé automatiquement, adéquat pour un fonctionnement sans antigel) [45, 50, 51] a débuté en 2002 et se poursuivra en 2003. Lors de la conception des capteurs du projet **Accadueo** [45], comportant 60 bandes d'absorbeurs en parallèle, il est apparu que la répartition du débit n'était pas prévisible de manière univoque, même avec le programme de calcul le plus sophistiqué actuellement [60]. La répartition du débit dans différents régimes d'écoulement et à différentes températures a fait l'objet d'un projet de mesures détaillées [56]. La faisabilité d'un diagnostic de la répartition hydraulique dans un champ de capteurs à l'aide d'une caméra infrarouge a également été étudiée. L'analyse des mesures est en cours ; elle permettra une meilleure compréhens-

sion des phénomènes et l'amélioration des méthodes de calcul, avec, à la clé, la maximisation des performances des systèmes concernés. Dans le cadre du projet **Flextube** [47], les conduites hydrauliques en caoutchouc au silicone ont été remplacées sur quinze installations de production d'eau chaude privées ; le comportement des matériaux synthétiques de remplacement fait l'objet d'un suivi *in situ* durant deux ans.

Qualités des installations solaires et détection de pannes

Deux approches complémentaires sont en cours d'évaluation. D'une part, les **méthodes spectrale et de bilan d'énergie** [46] visent en particulier à détecter à temps les dérives des performances d'une installation solaire, dérives pouvant apparaître de manière progressive et insidieuse, et si possible à en identifier la ou les causes. Les algorithmes propres à ces deux méthodes ont été appliqués sur des séries de valeurs mesurées sur deux installations solaires de types différents ; les résultats sont encourageants, les cas avec défauts étant dans la majorité des cas effectivement détectés. La méthode spectrale est peu exigeante en matériel de mesure supplémentaire, mais requiert une phase initiale d'acquisition lui permettant de définir et de mémoriser le comportement correct de référence. La durée et la représentativité de cette phase d'acquisition restent à définir ; la discrimination des différentes causes possibles d'une dérive doit également être analysée. L'autre approche, très pragmatique, vise à développer un **régulateur «intelligent»** capable d'identifier les principaux dysfonctionnements, voire leurs causes, compte tenu de leurs fréquences d'apparition observées en pratique [58]. La première phase s'est achevée en 2002 ; elle a établi les fréquences de panne en fonction de leur type, a défini le cahier des charges et a décrit l'ensemble des conditions logiques permettant de détecter de manière précoce les différents dysfonctionnements. Durant la deuxième phase, la logique proposée sera validée sur une installation réelle, suivie par une enquête sur l'accroissement de la fiabilité et de la confiance des exploitants résultant des fonctionnalités de ce régulateur.

Froid solaire

Deux systèmes frigorifiques à absorption et utilisant le couple "bromure de lithium – eau" ont été installés en 2002. L'un d'eux, d'une puissance de froid de 92 kW [54], sera alimenté par des capteurs plans de haute performance, avec appoint de chaleur par une chaudière à gaz. Le froid est destiné à la climatisation partielle d'une

banque. En l'absence de besoins de froid, la chaleur solaire sera utilisée pour le chauffage et pour l'eau chaude sanitaire. L'autre système, d'une puissance de froid de 46 kW [57], sera alimenté en chaleur exclusivement par 103 m² de capteurs solaires tubulaires évacués, l'utilisation de combustibles fossiles n'étant, dans le Canton (ZH), pas autorisée à des fins de production de froid. Le projet de construction d'un **réfrigérateur solaire autonome** [49] s'est achevé en 2002 par le test en climat sub-saharien du prototype fabriqué en Suisse et par la construction d'un modèle analogue avec les matériaux disponibles sur place. Ce bahut de réfrigération à adsorption utilise le couple "silicagel-eau" ; son coefficient de performance (COP) mesuré se situe entre 0,1 et 0,15 ; ce COP est intéressant, compte tenu du fait que ce système est indépendant de tout autre apport d'énergie (électrique ou fossile) et de toute manipulation humaine. Deux études de marché complémentaires (pays méditerranéens et Burkina Faso) ont montré que ce type de frigo est plutôt destiné à un marché de niches dans lesquelles ses particularités sont indispensables (dispensaires et organismes sanitaires, organisations agricoles notamment). Un atelier de production devrait voir le jour au Burkina Faso en 2003 ; des efforts de développement complémentaires (amélioration de l'ergonomie, réduction des coûts par optimisation du *design* notamment) sont nécessaires pour accroître l'intérêt et la pénétration de cette technique. Outre le transfert de technologies conformes au développement durable, l'intérêt pour la Suisse réside dans la valorisation de son savoir-

faire pour la réalisation de composants-clés, tels que le capteur-adsorbent et le clapet anti-retour.

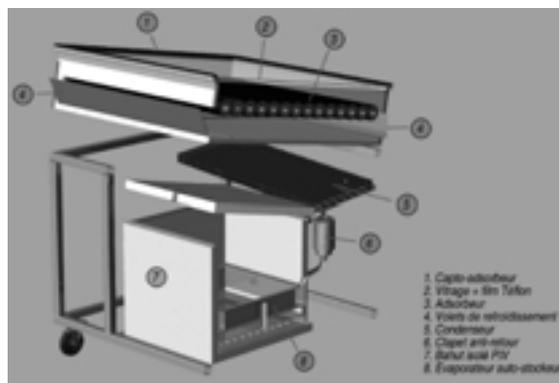


Figure 10 : vue en coupe du réfrigérateur à adsorption (et / ou éclaté d'un tube de l'absorbent)

Gestion du programme

Pour stimuler l'innovation et la démonstration, et pour permettre une utilisation efficace du budget P+D dans les années à venir, un dépliant «**Appel à propositions**» a été conçu en 2002 et distribué, à plus de 300 exemplaires, auprès des acteurs du solaire thermique [61]. L'écho est favorable, cet appel ayant déjà généré (ou réactivé) six demandes intéressantes. De plus, la valorisation des projets de démonstration réalisés s'est poursuivie par la préparation de cinq fiches de «**Bons exemples**» à disposition sur le site internet du programme.

Évaluation de l'année 2002 et perspectives pour 2003

Dans l'ensemble, l'année 2002 a été une bonne année pour le programme Solaire actif. Malgré des moyens limités, des projets ont pu être menés à bien.

Les recherches concernant les systèmes combinés ont fortement progressé : connaissance du comportement des meilleurs systèmes en Europe. La Tâche 26 du programme SH&C de l'AIE, que nous avons imaginée en 1998, a été un succès reconnu. Le banc d'essai des systèmes combinés est opérationnel au SPF et les industriels suisses ont inscrit leur produit à tester.

La demande en mesure et optimisation de capteurs solaires plans est toujours forte et avec le SPF on a eu les moyens d'y répondre, avec une continuité des méthodes et des installations. Les infrastructures de mesure sont en très bon état

et les logiciels aussi bien de mesures et d'archivages des données, que de dimensionnement sont constamment maintenus à jour. *Polysun* est apprécié dans toute l'Europe. Il sera réécrit avec les outils les plus performants se trouvant sur le marché.

Une découverte qui pourrait être importante pour l'industrie solaire est en cours de précision au LESO.

Le capteur à concentration CEP pourrait être intégré dans des projets avec des partenaires industriels. Des requêtes P+D vont être lancées en 2003 pour un support financier. Le projet SPS souffre quelque peu d'un manque de masse critique de financement, cela pour permettre de bâtir des équipes de recherche de 3 à 4 personnes actives au-delà de la réalisation d'une thèse.

L'installation de stockage de la SUVA à Root est construite. Un stockage diffusif sans pompe à chaleur d'environ 10'000 m³ pourrait enfin voir le jour dans un projet suisse à Heumatt.

En matière de stockage dense, nous progressons dans la connaissance du silicagel en fonctionnement dans un stockage par sorption.

En 2003, nous continuerons de fournir un support R+D important aux systèmes combinés du

marché (performances, qualité, améliorations). La nouvelle Tâche 32 **«Advanced storage concepts for solar buildings»** du programme SH&C de l'AIE devrait débiter en rassemblant des équipes de recherche excellent en matière de stockage chimique, par sorption ou à eau. La difficulté est pour les Européens le financement des travaux réalisés sous l'égide d'un programme de l'AIE, les laboratoires préférant élaborer des projets que la Communauté Européenne finance.

Liste des projets de R+D

(RA) Rapport annuel 2002 existant

(RF) Rapport final existant

(RI) Rapport intermédiaire existant

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

Solaire actif - chaleur

- [1] A. Bohren, U. Frei, SPF/HS-Rapperswil : SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ♦ **Teil A : Komponenten in solarthermischen Systemen** (RA 2002) <http://www.solarenergy.ch/>
- [2] P. Vogelsanger, B. Menzi, U. Frei, SPF/HS-Rapperswil : SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ♦ **Teil B : thermische Solarsysteme** (RA 2002) <http://www.solarenergy.ch/>
- [3] S. Brunold, U. Frei, SPF/HS-Rapperswil : SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ♦ **Teil C : Materialien in thermischen Systemen** (RA 2002) <http://www.solarenergy.ch/>
- [4] S. von Rotz, J. Marti, R. Chrenko, C. Galliker, U. Frei, SPF/HS-Rapperswil : SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie ♦ **Teil D : Informatik und Software** (RA 2002) <http://www.solarenergy.ch/>
- [5a] T. Pittet, J. Bony, Ph. Dind, Laboratoire d'énergétique solaire de l'EIVD Yverdon : **Optimisation d'installations solaires combinées** (RA 2002) <http://igt.eivd.ch/lesbat/default.htm>
- [5b] T. Prud'homme, D. Gillet, T. Pittet, J. Bony, P. Dind, Institut d'automatique EPF-Lausanne et Laboratoire d'énergétique solaire de l'EIVD Yverdon : **Optimisation d'installations solaires combinées** (RA 2002) <http://iawww.epfl.ch/>
- [6] M. Giroud, M. El Hajal, M. Merminod, D. Favrat, LENI/EPF-Lausanne: **SPS : mini-centrale pilote électro-thermo-solaire de 10 kW_{el} — Phase 5 : Développement du prototype industriel de l'unité ORC** (RF) ♦ EPFL Lausanne, Décembre 2002 (RA 2002) <http://leniwww.epfl.ch/publications>
- [7] Y. Allani, C. Pécoud, R. Bréguet, Y. Allani COGENER, Lausanne : **SPS : mini-centrale pilote électro-thermo-solaire de 10 kW_{el} — Phase 4 : Industrialisation du capteur CEP** (RA 2002) http://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 2002) <http://www.iea-shc.org/task26/index.html> <http://www.energy-research.ch/>
- [9] J. Remund, S. Kunz, Meteotest, Berne : **Project SODA: Integration and exploitation of networked solar radiation** (RA 2002) <http://www.soda-is.com/>
- [10] A. Schüler, LESO EPFL : **Projet Capteurs** (RA 2002, temporairement confidentiel) <http://www.lesowww.epfl.ch/>

Stockage de chaleur

- [11] P. Gantenbein, S. Brunold, U. Frei, SPF/HS-Rapperswil: **Sorptionsspeicher: Aufbau und Inbetriebnahme der Laboranlage** (RA 2002) <http://www.solarenergy.ch/>
- [12] P. Hartmann, H. Juzi, ZHW, Winterthur: **Vorprojekt Saisonspeicher Heumatt** (RA 2002) <http://www.zhwin.ch/>
- [13] D. Pahud, SUPSI-DCT-LEEE Canobbio: **Optimisation de l'installation de chauffage et de refroidissement par sondes géothermiques de Wollerau par calage d'un outil de simulation dynamique sur les mesures existantes** (RA 2002) <http://www.lee.dct.supsi.ch/urec.htm>
- [14] D. Pahud, SUPSI-DCT-LEEE Canobbio: **SERSO, stockage saisonnier de l'énergie solaire dans le terrain pour le dégivrage d'un pont. Optimisation de l'installation par calage d'un outil de simulation dynamique sur les mesures existantes** (RA 2002) <http://www.lee.dct.supsi.ch/urec.htm>
- [15] P. Hollmuller, CUEPE Genève: **Déphasseur thermique diffusif** (RA 2002) <http://www.unige.ch/cuepe>
- [16] M. Götz, Centre Neuchâtelois de cuisine solaire: **Stockage de chaleur diurne pour un cuisinier solaire à concentration** (RA 2002) <http://www.cuisinesolaire.com>
- [17] M. Götz, Centre Neuchâtelois de cuisine solaire: **Stockage de chaleur diurne pour un cuisinier solaire à concentration** (RF 24 pages) <http://www.cuisinesolaire.com>

Liste des projets P+D «Stockage de chaleur»

- [18] P. Berchtold, Saarnen : **Unternehmens- und Innovationszentrum D4 in Root (LU) Grösster saisonaler Diffusionspeicher der Schweiz** (Projet P+DB) (RA 2002)
- [19] H. Schär, St Gallen: **Erdspeicheranlage für das Weiterbildungszentrum Hochschule St. Gallen** (RI 3.9.02, RA non reçu)
- [20] F. Fleury, Épalinges: **Villa solaire avec stockage saisonnier en molasse** (Rapport non reçu)
- [21] P. Léchaire, Les Brenêts: **Maison solaire avec stockage saisonnier central chauffé par capteurs à air** (Rapport non reçu)
- [22] P. Hollmuller, B. Lachal, CUEPE Genève: **Projet COSTEAU : Collecteurs souterrains à eau pour chauffage et rafraîchissement** (RI octobre 2002, RF à paraître en 2003)

Références

- [23] J.-C. Hadorn, Ing-Conseil: Programme Solaire actif – Chaleur, **Rapport annuel 1998, 1999, 2000, 2001**, OFEN
- [24] J.-C. Hadorn, Ing-Conseil: Programme Stockage de chaleur, **Rapport annuel 1998, 1999, 2000**, OFEN
- [25] C. Müller-Schöll, S. Brunold, U. Frei, **Significance of Spectral Correction of Collector Measurements Performed in Solar Simulators**. Proceedings of the Eurosun 2002 Conference, Bologna (I).
- [26] D. Pahud, SUPSI-DCT-LEEE Canobbio, **Étude pilote pour le stockage diffusif des bâtiments du centre D4 de la Suva à Root, Lucerne**, Rapport final, Décembre 2001 <http://lee.dct.supsi.ch/lee-urec>
- [27] T. Prud'homme, D. Gillet, **Advanced Control Strategy of Solar Combisystems**. To be published. Feb. 2002

- [28] S. Martin, M. Kane, D. Favrat, **Small Hybrid Solar Power System**: First Field Test Results, HEFAT 2002. 1st International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics. 8-10 April 2002, Kruger Park, South Africa, http://leniwww.epfl.ch/publications/Show?record_id=386
- [29] M. Kane, D. Favrat, **Multicriteria Optimisation of Small Hybrid Solar Power System**, Euro-Sun 2002, June 23-26, 2002, University of Bologna «San Giovanni in Monte», Bologna, Italy
- [30] M. Kane, **Intégration et optimisation thermoéconomique et environnologique de centrales thermiques solaires hybrides**, Thèse EPFL, 2001
- [31] Y. Allani., D. Favrat, J.-C. Hadorn, **Des systèmes hybrides pour passer la nuit**, ENET-News n° 47, Berne, mars 2001, pages 12 et 13
- [32] Y. Allani, J.-S. Thély, C. Pécoud, **SPS Rapport final 2002, Exploitation du prototype et pré-industrialisation**, Cogener, 1015 Lausanne, janvier 2002
- [33] C. Müller-Schöll, S. Brunold, U. Frei, **Significance of Spectral Correction of Collector Measurements Performed in Solar Simulators**, Proceedings 4th ISES Europe Solar Congress Eurosun 2002, 23. bis 26. Juni 2002, Bologna, Italy.
- [34] S. Brunold, U. Frei, **Certification of Solar Glass**, Proceedings 4th ISES Europe Solar Congress Eurosun 2002, 23. bis 26. Juni 2002, Bologna, Italy.
- [35] J.-C. Hadorn, W. Weiss, J.-M. Suter, T. Letz, **System Designs and Performance of Solar Combisystems – Status Report of Task 26 in the IEA Solar Heating and Cooling Programme**, Proceedings 4th ISES Europe Solar Congress Eurosun 2002, 23. bis 26. Juni 2002, Bologna, Italy.
- [36] P. Hollmüller, **Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments**, Thèse, Université de Genève, 2002.
- [37] H. Juzi, J.-C. Hadorn, U. Wolfer, **Stockage en sous-sol**, ENET-News n° 52, Berne, juillet 2002, page 14

Liste des projets P+D «Solaire actif – Chaleur»

- [38] C. Trachsel, (christian.trachsel@ne.ch), SECTION DE L'URBANISME, Neuchâtel: **Préchauffage solaire pour le bâtiment destiné aux personnes âgées, Immeuble de la Dime 72, 2000 Neuchâtel** (RF) www.solararch.ch
- [39] A. Weber, (andres.weber@amstein-walthert.ch), KORONA ENERGIE GMBH, Männedorf: **Fassadenkollektor zur Integration in Isolierfassaden (FIIFA)** (SB) www.solararch.ch
- [40] Y. Frosio, (annyf@vtx.ch), AS AVANCE SOLAIRE, Apples: **Préchauffage solaire – Vestiaires terrains de sport de Cugy** (RF) www.solararch.ch
- [41] W. Roth, BELLEVUE, Hasliberg Hohfluh: **Solaranlage Hotel Bellevue, Hasliberg**
- [42] E. Paravicini, (ep@maxwalter.ch.ch), MAX WALTER GMBH, Regensdorf: **Solare Wassererwärmung für einen Industriebetrieb (GRETAG AG)** (SB) www.solararch.ch
- [43] Y. Frosio, (annyf@vtx.ch), AS AVANCE SOLAIRE, Apples: **Contracting solaire - Immeuble Primeroche, Prilly** (RF) www.solararch.ch
- [44] C. Völlmin & G. Baumeler, (sopra@bluewin.ch), SOPRA SOLARPRAXIS AG, Ormalingen: **Zentrale Solaranlage für 12 Hausteile – Sonnhalde in Ebikon** (SB) www.solararch.ch
- [45] L. Engeler, (info@sesolar.ch), SALERNO ENGELER GMBH, Langenbruck: **Drain-Back Solaranlage ACCADUEO, Waldenburg**

- [46] U. Grossenbacher, (e-buero@sesamnet.ch), ENERGIEBÜRO GROSSENBACHER, Murten: **Qualitätssicherungssystem für Solaranlagen – Methode zur permanenten Funktionskontrolle thermischer Solaranlagen** (ZB, JB) www.solarch.ch
- [47] U. Frei, (ueli.frei@solarenergy.ch), HSR RAPPERSWIL - INSTITUT FÜR SOLARTECHNIK (SPF), Rapperswil: **Einsatz flexibler Verbindungsleitungen aus Kunststoff in der thermischen Solartechnik (FLEXTUBE)**
- [48] U. Frei, (ueli.frei@solarenergy.ch), HSR RAPPERSWIL - INSTITUT FÜR SOLARTECHNIK (SPF), Rapperswil: **Prüfung von solaren Kombisystemen (KOMBI KOMPAKT+)**
- [49] J. Mayor, (jmayor@eivd.ch), HES-SO – ÉCOLE D'INGÉNIEURS DU CANTON DE VAUD (EIVD), Yverdon-les-Bains: **Construction et test d'un réfrigérateur solaire à adsorption transportable** (RF) www.solarch.ch
- [50] B. Salerno, (basso.salerno@sesolar.ch), SALERNO ENGELER GMBH, Langenbruck: **Drain-Down-System für grosse Solaranlagen**
- [51] U. Muntwyler, (muntwyler@solarcenter.ch), MUNTWYLER ENERGIETECHNIK AG, Zollikofen: **Drain-Back-Kompaktanlagen** (JB) www.solarch.ch
- [52] R. Koen, JSP GREENPEACE CH, Bern: **JugendSolarProjekt, Solaranlage Kinderdorf Pestalozzi, Trogen**
- [53] R. Koen, JSP GREENPEACE CH, Bern: **JugendSolarProjekt, Solaranlage Munt la Reita, Cimalmotto**
- [54] C. Hilgenberg, (christian.hilgenberg@iem.ch), INGENIEURBÜRO IEM AG, Gwatt-Thun: **Solarbetriebene Absorptions-Kältemaschine mit Heizungsunterstützung**
- [55] B. Sitzmann, (sitzmann@oekozentrum.ch), OEKOZENTRUM, Langenbruck: **Zirkulationseinbindung von solaren Warmwasseranlagen im MFH**
- [56] L. Engeler, (info@sesolar.ch), SALERNO ENGELER GMBH, Langenbruck: **Untersuchung des Verhaltens grosser parallelgeschalteter Kollektorfelder** (SB) www.solarch.ch
- [57] F. Beuchat, (beuchat@rmb.ch), REUST MARTI + BEUCHAT AG, Zürich: **Solarbetriebene Absorptions-Kältemaschine MGB-Zürich**
- [58] J. Bony, (agena.jbony@bluwin.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

Références P+D

- [59] B. Sitzmann, **Kosteneinsparungen bei solaren Warmwasseranlagen durch Einbindung in die Warmwasserzirkulation**, (SB 2001) www.solarch.ch et ENET
- [60] Software **Absorber-Master**, SPF – Rapperswil, www.solarenergy.ch
- [61] Document téléchargeable du site www.solarenergy-thermal.ch (accessible depuis www.solarch.ch) en recherchant *Appel à propositions* (resp. *Ideen gesucht*) sous la rubrique *Fiches* du Programme Pilote et Démonstration.

PHOTOVOLTAIK

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2002

Stefan Nowak

stefan.nowak@netenergy.ch



283 kWp Photovoltaik-Beschattungsanlage, Dock Midfield, Flughafen unique, Zürich

Beim Bau des neuen Docks Midfield wurde als wichtiger Bestandteil des architektonischen Konzepts eine multifunktionale Photovoltaik - Beschattungsanlage integriert. Bauherr: *unique / Flughafen Zürich AG*, PV Planer: *ARGE Zayetta*, Photovoltaik: *ZAGSOLAR* (Bildquelle *unique / Ralph Bensberg*)

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Programm *Photovoltaik* (PV) war im Jahr 2002 durch weitgehende Kontinuität in der Forschung und zunehmende marktorientierte Aktivitäten gekennzeichnet. Letztere nahmen in der Form von neuen Industrieprojekten konkrete Formen an. Nebst neuen Umsetzungsprojekten im Bereich der Dünnschicht Solarzellen, sind weitere neue Industrietätigkeiten zu verzeichnen. Damit erfolgt für die Photovoltaik Forschung und Entwicklung in der Schweiz der Aufbau einer wachsenden Industriebasis, welche neue Elemente der gesamten industriellen Wertschöpfungskette erschliessen kann. Das Programm verfolgte dabei weiterhin eine ausgeprägte internationale Ausrichtung. Laufende Aktivitäten in Forschung und Entwicklung sowie Pilot- und Demonstrationsanlagen umfassen im Berichtsjahr 2002 rund 85 Projekte, wobei alle bekannten Projekte mit einer Förderung der öffentlichen Hand berücksichtigt sind. Die Anzahl der Projekte und der Mitteleinsatz liegen in der Grössenordnung des Vorjahres. Entsprechend dem von der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE genehmigten *Forschungskonzept Photovoltaik 2000 – 2003* [45] ist das Programm *Photovoltaik* in folgende Bereiche gegliedert:

Solarzellen der Zukunft

Die Arbeiten zu **Dünnschicht-Solarzellen** wurden im Berichtsjahr weitergeführt mit den Schwerpunkten **Silizium** (amorph, mikrokristallin, Grundlagen für Nieder-Bandgap), Zellen auf der Basis von **Verbindungshalbleitern** (CIGS, CdTe) sowie **Farbstoffzellen**. Neue Produktionsprozesse stehen 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

Für Solarmodule werden neue **Verfahren** zur Konfektionierung hinsichtlich Wirkungsgrad und Kostenreduktion entwickelt. Die **Integration der Photovoltaik** im bebauten Raum bildet weiterhin den wichtigsten Schwerpunkt der angestrebten Anwendungen. Echte und ansprechende Integrationslösungen an Flachdach, Schrägdach und Fassaden stehen dabei im Vordergrund und werden mit einer industriellen Ausrichtung verfolgt. Während bis anhin häufig Lösungen für

die Integration von kristallinen Solarmodulen im Vordergrund standen, wird aktuell vermehrt die Integration von Dünnschicht Solarzellen in Gebäudebauteile angestrebt.

Elektrische Systemtechnik

Die **Qualitätssicherung** von Photovoltaikmodulen, von Wechselrichtern und von gesamten Systemen bildet, zusammen mit **Langzeitbeobachtungen** an diesen Komponenten, ein Thema mit hoher Relevanz für die Praxis. Langjährige Messreihen bilden die Grundlage für statistische Informationen und Erfahrungen mit dem Betrieb von verschiedenen Anlagenkonzepten. Ein neuer Akzent wird auf die bessere Vorhersage des **Energieertrags** von Solarmodulen gelegt. Dieser ist auch Gegenstand der notwendigen **Standardisierung** von Produkten und Systemen und der dazugehörigen **Normen**. Für Inselanlagen sind zuverlässige und langlebige Speicher ebenfalls von Bedeutung.

Ergänzende Projekte und Studien

Im Vordergrund dieses Bereichs stehen Projekte, welche die erfolgreiche Umsetzung von Projekten begünstigen und für 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. Die **Thermophotovoltaik** bildet ein Schnittstellenthema, welches in letzter Zeit vermehrtes Interesse geweckt und neue Entwicklungen hervorgebracht hat.

Institutionelle internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit bildet ein zentrales Standbein in allen Bereichen. Der Anschluss an die internationale Entwicklung sowie ein intensivierter Informationsaustausch war im Berichtsjahr ein wichtiges Ziel, welches im Rahmen der internationalen Programme der **EU** sowie der **IEA** mit Kontinuität weiterverfolgt wurde. Es konnten durch die internationale Zusammenarbeit eine ganze Reihe von neuen und praxisrelevanten Resultaten erarbeitet werden. Damit ist in wissenschaftlich-technischer Hinsicht ein guter Anschluss der Schweizer Photovoltaik an die internationale Entwicklung gewährleistet.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

ZELL-TECHNOLOGIE

Die **grosse Bandbreite der Schweizer Solarzellenforschung** konnte im Berichtsjahr 2002 mit Unterstützung verschiedenster Institutionen fortgesetzt werden. Neue grundlegende Arbeiten finden im Programm *TOP NANO 21* des ETH-Rates ihre Fortsetzung. Andererseits finden auch mehr Industrie-Projekte mit Unterstützung der KTI statt. Die ausgeprägte Zusammenarbeit innerhalb von EU-Projekten belegt die internationale Konkurrenzfähigkeit der Schweizer Solarzellenforschung.

Dünnschicht Silizium

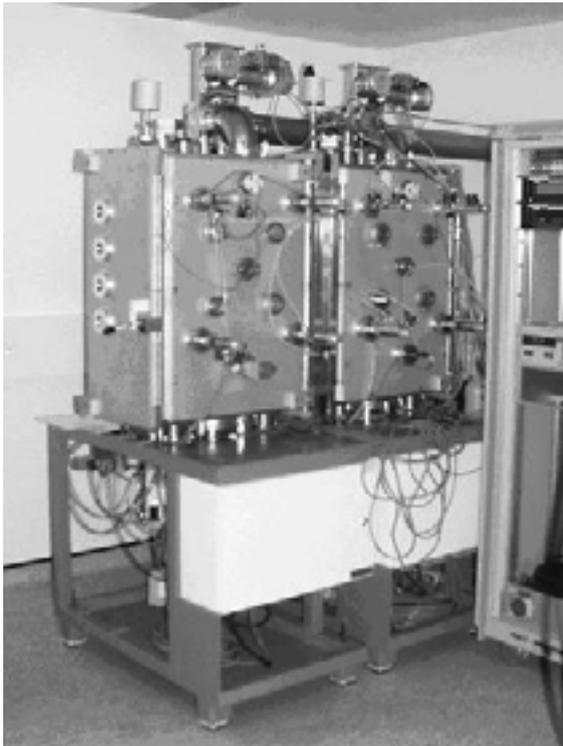
Im Berichtsjahr schloss das IMT an der Universität Neuchâtel eine wichtige Projektphase bei den **mikromorphen Solarzellen** [1a] mit Schwerpunkt auf industriell relevanten Produktionsschritten und -prozessen ab. Die Arbeiten konzentrieren sich auf die Verbesserung der Eigenschaften transparenter Oxydschichten (TCO), die Möglichkeiten zur Optimierung der p-i-n und n-i-p Schichtabfolgen für das amorphe Silizium sowie die Herstellung von mikromorphen Mini-Modulen. Die Resultate in den einzelnen Arbeitsbereichen können wie folgt zusammengefasst werden: Für die Abscheidung von mikrokristallinem Silizium konnte die Abscheiderate auf 25Å/s erhöht werden. Andererseits konnte für einfache amorphe Zellen in der p-i-n Schichtabfolge der stabilisierte Wirkungsgrad auf 9.5% verbessert werden. Für p-i-n/p-i-n mikromorphe Zellen wurde ein stabilisierter Wirkungsgrad von 10.8% realisiert. Mikromorphe Tandemzellen mit einer TCO Zwischenschicht erreichten vergleichbare 10.7% Wirkungsgrad. Minimodule von $8 \times 8\text{ cm}^2$ erreichten einen Wirkungsgrad für amorphe p-i-n Zellen von 8.5% und für mikromorphe p-i-n/p-i-n Zellen von 9.8%. Die umgekehrte Schichtabfolge wurde für n-i-p amorph, n-i-p mikrokristallin und n-i-p/n-i-p mikromorph untersucht. Die Arbeiten an den mikromorphen Solarzellen wurden im Berichtsjahr auch im EU-Projekt **DOIT** [1b] weitergeführt. Hier ist das Ziel ein mikromorphes Klein-Modul von $30 \times 30\text{ cm}^2$ mit einem stabilen Wirkungsgrad von 11%; die Hauptaufgabe des IMT besteht in diesem Zusammenhang in der Verwendung der VHF-Deposition für die grossflächige Abscheidung (Fig.1). Mittels VHF-Deposition bei 135 MHz wurde mikrokristallines Silizium bei 10Å/s abgeschieden. Mit diesem Material wurden im Berichtsjahr erste Zellen optimiert; als Zwischenziel wird hier ein Wirkungsgrad von 5% angestrebt.

Die Anstrengungen hinsichtlich der industriellen Umsetzung des am IMT erarbeiteten Know-hows wurde mit Unterstützung von ENET intensiv weiter verfolgt und mit einem beachtlichen Erfolg beschieden: Ende 2002 beschloss der Verwaltungsrat von *Unaxis* erfreulicherweise und nach intensiven Verhandlungen eine grössere Zusammenarbeit mit dem IMT, mit dem Ziel, in der Herstellung von industriellen Produktionsanlagen für mikromorphe Solarzellen eine führende Position einzunehmen. Dazu wird die Einheit *Unaxis solar* gegründet und in Neuchâtel ein Industrielabor aufgebaut, welches den Technologietransfer realisieren soll. Eine erste industrielle Investitionsphase umfasst dabei 2 Jahre (Fig. 2).

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 fortgesetzt. Untersuchungen wurden mit der am CRPP vorhandenen *Unaxis* Plasma-Beschichtungsanlage durchgeführt, am IMT wurden mit einer ähnlichen Anlage entsprechende Solarzellen auf das Trägermaterial deponiert. Eine wichtige Frage betrifft die Bor-Kontamination in einem Einkammer-System, für welche Lösungen erarbeitet werden konnten. Die Depositionsgeschwindigkeit bildete ebenfalls eine wichtigen Fragenkomplex: Solarzellen gemäss Projektspezifikationen konnten im Berichtsjahr bisher bei 2Å/s erzielt werden und dieser Wert soll weiter erhöht werden. Dieses KTI-Projekt ist ebenfalls ein wichtiges Element des oben aufgeführten Technologie Transfers zu *Unaxis*.

Die Fachhochschule in Le Locle arbeitet zusammen mit *VHF Technologies* an einem Projekt für den effizienten Lichteinfall durch gezieltes **Aufrauen von Polymer Substraten** [3a]. Dies soll zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades der amorphen Solarzellen führen. Es wird dabei reaktives Ionen-Ätzen mittels SF_6/O_2 angewendet. In Abhängigkeit der Prozessparameter dieser Behandlung konnten verschiedene Rauigkeiten erzielt werden, wobei die Homogenität noch verbessert werden muss.

In einem neuen *TOP NANO 21* Projekt wurde am IMT, in Zusammenarbeit mit *VHF-Technologies*, die Machbarkeit **optischer Nano Gitter** [1c] für den Lichteinfall in nanokristallinen Siliziumzellen untersucht. Dabei wurden zufällig generierte Texturen sowie periodische Gitter eingesetzt. Die besten Resultate wurden mit zufälligen Struktu-



Figur 1: Einkammer 30x30 cm² VHF Plasma Depositions-anlage am IMT (Projekt DOIT, Bildquelle IMT / Uni NE)



Figur 2: Industrielle Plasma Depositionsanlage (Bildquelle Unaxis)

ren erzielt, die eine Erhöhung des Kurzschlussstromes von nanokristallinen Silizium Solarzellen um 16% erlaubten.

Das Projekt am PSI zur Entwicklung von **Nieder-Bandgap-Zellen** für Anwendungen der Thermophotovoltaik [4a] wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Die Arbeiten bezüglich der photovoltaischen Zelle konzentrierten sich dabei auf das Wachstum von SiGe Quantum Well Strukturen und Ge Inseln auf Si Oberflächen, welche in einem UHV-CVD-Reaktor hergestellt wurden. Der Absorptionskoeffizient der SiGe Schichten wurde bestimmt.

Kristallines Silizium

Im neuen EU-Projekt **RE-SI-CLE** beteiligt sich *HCT Shaping Systems* [5] an der Erarbeitung von neuen Prozessen, welche eine Extraktion von Rohsilizium aus Siliziumabfällen der Verarbeitungskette für die Wiederverwendung im Produktionsprozess anstrebt. Damit soll auch ein Beitrag an die Rohstoffproblematik des kristallinen Siliziums geleistet werden.

II-VI Verbindungen (CIGS, CdT)

Die Gruppe Dünnschichtphysik an der ETHZ hat über Jahre EU-Projekte zum Thema Solarzellen auf

der Basis von Verbindungshalbleitern (CIGS, CdTe) durchgeführt. Im aktuellen EU-Projekt, **PROCIS** [6a], werden produktionsrelevante Aspekte für CIGS Zellen auf grösserer Fläche entwickelt: Die Möglichkeiten, den Wirkungsgrad dieser Zellen durch den kontrollierten Einbau von Natrium zu erhöhen, wurden detailliert untersucht und gelten damit als etabliert. Mittels unterschiedlicher Vakuumprozesse wurden CIGS Solarzellen mit CdS Pufferschichten hergestellt. Diese sind den Schichten aus ZnS und ZnSe bezüglich dem erreichbaren Wirkungsgrad überlegen.

Im Projekt **NANOCIS** [6b] innerhalb des Programms **TOP NANO 21** werden gänzlich neue Herstellungsprozesse für CIGS Zellen auf der Grundlage von Nanopartikeln angestrebt. Die CIGS Absorberschicht wird durch eine selenhaltige Atmosphäre und unter Verwendung geeigneter *Precursor*-Schichten gesintert. Es wird eine vollständige Konversion der *Precursor* in entsprechende CIGS Verbindungen beobachtet; erste Solarzellen dieser Art zeigen in einer Strom-Spannungskennlinie (I-V-Kennlinie) einen Wirkungsgrad von mindestens 4%.

Farbstoffzellen

Die Entwicklung von farbstoffsensibilisierten, **nanokristallinen Solarzellen** [7a] wird am ICP

der EPFL verfolgt. Im Berichtsjahr wurden die Arbeiten an festen Hetero-Übergängen fortgesetzt. Diese Arbeiten sind ebenfalls Bestandteil eines Projektes innerhalb des Programms *TOP NANO 21* [7b]. Zusammen mit *Greatcell Solar* werden dabei **Innenraum-Anwendungen** der Farbstoffzelle entwickelt. In einem PSEL-Projekt werden die **Freiluftmessungen** [7c] an farbstoffsensibilisierten Solarzellen fortgesetzt; diese sollen das Verhalten der Zellen unter realen Ausserbedingungen beschreiben. Von besonderem Interesse ist das Verhalten unter UV-Strahlung. Die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Luftmasse konnte nachgewiesen werden. Im neuen EU-Projekt **NANOMAX** [7d] sollen alternative Wege für die Herstellung der 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 Erhöhung auf 15% und 9% auf einer Fläche von 100 cm² angestrebt. Der australische Lizenznehmer *STI* der Farbstoffzelle hat inzwischen eine erste gebäudeintegrierte Pilotanlage mit Farbstoffzellen vorgestellt [46].

Antennen-Solarzellen

An der Universität Bern wurden die grundlegenden Arbeiten zu **Antennen-Solarzellen** [8] 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.

SOLARMODULE UND GEBÄUDEINTEGRATION

Gebäudeintegrierte Anlagen stellen nach wie vor das wichtigste Anwendungsgebiet der Photovoltaik in der Schweiz dar. Während in Solarstrombörsen häufig die kostengünstigsten Lösungen für Flachdachanwendungen zum Einsatz gelangen, wird weiterhin an der Kostenreduktion von Lösungen mit einem stärkeren Integrationsaspekt gearbeitet. Da inzwischen für die Montage am Gebäude eine Reihe von Systemen erfolgreich umgesetzt werden konnten (siehe auch Abschnitt P+D), verlagert sich die Entwicklung vermehrt auf das Solarmodul selbst. Schweizer Unternehmen beteiligen sich hier an verschiedenen neuen EU-Projekten.

In einem neuen KTI-Projekt arbeiten *VHF-Technologies* und *Alcan Technology & Management* mit der Fachhochschule in Le Locle zusammen, um

auf der Basis von *Alucobond*® ein **PV-Komposit-Modul** [3b] für gebäudeintegrierte Anwendungen zu entwickeln. Ein Fabrikationsprozess für grossflächige Module und die notwendigen Technologien für die Laminierung konnten etabliert werden. Bisher wurde ein stabiler Wirkungsgrad von 3% erzielt und erste Prototypenmodule von 2m x 1m Fläche liegen für Testzwecke vor (Fig. 3).



Figur 3: Einkammer 30x30 cm² VHF Plasma Depositionsanlage am IMT (Projekt DOIT, Bildquelle IMT / Uni NE)



Figur 4: Industrielle Plasma Depositionsanlage (Bildquelle Unaxis)

Swiss Sustainable Systems arbeitet an verschiedenen EU-Projekten zur PV-Gebäudeintegration mit. Im Projekt **HIPERB** [9a] wird die Verwendung von CIGS Zellen in Photovoltaik Dach- und Fassadensystemen entwickelt. Im Berichtsjahr wurden Prototypen von CIS Modulen vorgestellt. Eine Kombination mit dem Produkt *Megaslate®* wird angestrebt (Fig. 4). Im Projekt **AFRODITE** [9b] sollen unter Verwendung von rückkontaktierten, kristallinen Solarzellen neue ästhetisch ansprechende Lösungen für die PV-Gebäudeintegration entwickelt werden.

Kurth Glas & Spiegel beteiligt sich am EU-Projekt **ADVANTAGE** [10], in welchem es ebenfalls um die Rückkontaktierung von Solarzellen in Hinsicht auf die PV-Gebäudeintegration geht.

Alcan Packaging beteiligt sich am EU-Projekt **HIPROLOCO** [11], in welchem neue kostengünstigere Verfahren zur Einkapselung von Solarzellen in Modulen entwickelt werden.

Das Projekt **DEMOSITE** [12] an der ETH Lausanne wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Es zeigt nebeneinander zahlreiche Varianten der Photovoltaik-Gebäudeintegration auf Flachdächern, Schrägdächern und Fassaden. Als internationales Projekt ist es in das ebenfalls abgeschlossene Projekt Task 7 des *IEA PVPS*-Programms eingebettet. Aufgrund der Möglichkeiten zum praxisnahen Vergleich konnten im Verlauf des Projekts verschiedene Produkte verbessert oder Lösungen angeregt werden. Im Berichtsjahr konzentrierten sich die abschliessenden Arbeiten auf die Verbreitung der Informationen unter anderem über Internet (www.demosite.ch).

Enecolo beteiligte sich am EU-Projekt **ENERBUILD** [13a] (www.enerbuild.net), welches als thematisches Netzwerk bezüglich Energie im Gebäude die laufenden F+E-Aktivitäten erfassen und die Zusammenarbeit in diesem Gebiet verstärken soll. Dabei ist *Enecolo* für das Arbeitspaket *Photovoltaik in Gebäuden* verantwortlich. Im Berichtsjahr wurden zwei *Enerbuild newsletters* und Projektbeschreibungen erstellt sowie die Empfehlungen für künftige Strategien zu den 6 Hauptprioritäten erarbeitet. Für die Photovoltaik-Gebäudeintegration stehen sowohl die anhaltende Notwendigkeit weiterer F+E-Arbeiten, die Normierung als Bau- und Gebäudeelemente, verstärktes Marketing und die zielgerichtete Ausbildung im Vordergrund der Empfehlungen.

Verschiedene weitere neue Konzepte und Produkte zur Photovoltaik-Gebäudeintegration wurden im Rahmen von P+D-Projekten erprobt (siehe Abschnitt *Pilot- und Demonstrationsprojekte*).

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 ist weiterer Handlungsbedarf gegeben. Dieser Bedarf betrifft besonders auch Komponenten für die Gebäudeintegration, für welche trotz wachsendem Markt noch keine verbindlichen Normen vorliegen.

Das LEEE-TISO an der SUPSI setzte im Berichtsjahr das Projekt zu **Qualitätssicherung und Energieertrag von Photovoltaik Modulen** [14a] fort. Der 8. Testzyklus an insgesamt 12 Solarmodulen wurde abgeschlossen und eine 9. Messserie an 14 weiteren Modultypen (3 sc-Si, 9 mc-Si, 2 a-Si) begonnen (Fig. 5). Die Methode der sogenannten Leistungsmatrix P(G,Ta) konnte im Berichtsjahr verbessert werden und erweist sich als aussagekräftiges Instrument zur Charakterisierung von Solarmodulen, welches in Zukunft als Werkzeug für den Planer eingesetzt werden soll. Im Mai 2002 erreichte die 10 kWp Anlage am TISO 20 Jahre dokumentierten Betrieb, was international die wohl längste Erfahrung mit einer netzgekoppelten PV-Anlage darstellt. Das im Vorjahr gemäss ISO 17025 für Messungen zertifizierte Labor mit dem Sonnen-Simulator der Klasse A konnte weiterhin zuverlässig eingesetzt werden. Für externe Kunden wurden rund 100 I-V Kennlinien gemessen. Die Messungen an den 3 Photovoltaik-Anlagen des TISO wurden fortgesetzt.

Das EU-Projekt **MTBF-PV** [14b], welches das TISO zusammen mit der Europäischen Prüfstelle ESTI in Ispra durchführt, wurde im Berichtsjahr an der 20 Jahre alten 10kWp Anlage fortgesetzt. Ausführliche Messungen zeigen eine durchschnittliche Leistungseinbusse von $-0.2\%/Jahr$ über 20 Jahre und damit eine hohe Zuverlässigkeit der Module. Detaillierte Untersuchungen erfolgten an einzelnen Zellen und Modulen mittels I-V Kennlinien, IR Analyse und beschleunigten Alterungsmessungen. Dadurch konnten die Effekte der Vergilbung, Delamination, hot spots und Oxydation der Kontakte quantifiziert werden. Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse kann ein Betrieb der Anlage über weitere 10-15 Jahre erwartet werden.

Das PSI entwickelte aufgrund der Messungen an verschiedenen Solarmodulen eine **Methode zur**



Figur 5: TISO PV Modulsteststand (Bildquelle LEEE TISO)

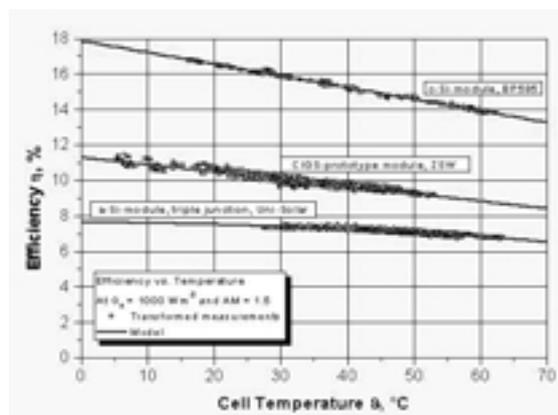
Berechnung des Jahresenergieertrags [4b].

Dabei konnte das unterschiedliche Verhalten verschiedener Technologien (mc-Si, a-Si, CIS, CIGS) dokumentiert werden. Mit dem Modell kann der Einfluss von Temperatur, Einstrahlungsintensität und Luftmasse auf den Wirkungsgrad dargestellt werden (Fig. 6).

Das Thema des **Energieertrags von Solarmodulen** [13b] wurde im Berichtsjahr auch im Rahmen eines durch *Enecolo* organisierten nationalen Workshops behandelt. Dabei wurden verschiedene Mess- und Modellverfahren zu diesem Thema verglichen und der Handlungsbedarf für praxisrelevante Werkzeuge abgeleitet.

Am Photovoltaiklabor an der HTA Burgdorf wurde das Projekt über das **Langzeitverhalten von netzgekoppelten Photovoltaik Anlagen** [15] mit Unterstützung der *Gesellschaft Mont Soleil*, der *Localnet AG* und *Elektra Baselland* sowie des BFE fortgesetzt. In diesem Projekt werden nun 42 Anlagen mit 55 Wechselrichtern messtechnisch erfasst. Die Wechselrichter-Zuverlässigkeit konnte auch im Berichtsjahr entgegen den Erwartungen weiter erhöht werden. Zuverlässigkeit und Energieertrag der 560 kWp Anlage Mont Soleil konnten im Berichtsjahr ebenfalls gesteigert werden. Andererseits zeigten ausgewählte Anlagen zum Teil erhebliche Leistungseinbußen. Insgesamt wird über die beobachteten Anlagen ein langsamer Rückgang der Jahresenergieproduktion festgestellt.

Im EU-Projekt **INVESTIRE** [16a] beteiligt sich Dynatex zusammen mit 19 weiteren Unternehmen und 15 Forschungslabors an der breiten Evaluation von Speichertechnologien für erneuerbare Energien und speziell Photovoltaik-Insulanlagen. Die insgesamt 9 Speichertechnologien umfas-



Figur 6: Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Zellentemperatur für drei verschiedene Modultechnologien (Bildquelle PSI)

sen die wichtigsten Batterietypen (Blei, Lithium, Nickel, Metall-Luft) sowie alternative Speicherungsverfahren (Supercaps, Elektrolyse/Wasserstoff/Brennstoffzelle, Schwungrad, komprimierte Luft, Redox-Systeme). Die charakteristischen Parameter dieser Speichertechnologien konnten vergleichend zusammengestellt werden. Es zeigt sich aufgrund dieses Vergleichs, dass aus wirtschaftlicher Sicht ein Verdrängen des Bleiakкумуляtors in den Hauptanwendungen schwierig ist. Einzig die Methode mit komprimierter Luft stellt eine Alternative dar. Für besondere Anwendungen (z.B. portable Geräte, kurzfristige Speicherung oder hohe Energiemengen) sind jedoch andere Verfahren geeigneter.

ERGÄNZENDE PROJEKTE UND STUDIEN

Meteotest beteiligt sich am EU-Projekt **SoDa** [17], welches weltweite Solardaten per Internet vermitteln soll (<http://www.soda-is.com>). Im Berichtsjahr wurde ein Prototyp des Internet-Services erstellt. SoDa ist nicht nur eine (vereinfachte) online-METEONORM, sondern sie besteht auch aus einer Verknüpfung der Datenmodelle und Datenbanken der **METEONORM** [47] und des Europäischen Strahlungsatlases **ESRA** [48]. Es stehen im Prototypen auch einfache Modelle zur Simulation von Photovoltaik-Anlagen zur Verfügung.

Das CUEPE an der Universität Genf beteiligt sich am EU-Projekt **Heliosat 3** [18] zur energiespezifischen Bestimmung der Solarstrahlung aus Meteosat-Daten. Der im Herbst 2002 neu eingesetzte Satellit *MSG (Meteosat second generation)* (<http://www.esa.int/msg/>) soll in diesem Projekt zum Einsatz gelangen. Die Daten dieses neuen Satelliten sollen präzisere Strahlungsdaten ermöglichen.

Diesystemorientierten Arbeiten zur **Thermophotovoltaik** [4a] wurden am PSI im Rahmen des neuen KTI-Projekts **HEAT** [4c] zusammen mit *Hoval*, *Solaronix* und der EMPA fortgesetzt. Im Vordergrund der Anwendungen steht der autonome Betrieb von Heizkesseln ohne Stromzufuhr. Im Berichtsjahr wurden Gewebe Emittoren aus seltenen Erden hergestellt und optisch charakterisiert, passende Filterschichten auf der Grundlage von leitenden transparenten Oxyden untersucht und in einem TPV-Demonstrationssystem unter Verwendung von kommerziellen Siliziumzellen getestet.

E4TECH beteiligte sich am EU-Projekt **Euro-Islas** [19], welches im Berichtsjahr abgeschlossen wurde. Das Projekt hatte zum Ziel, die Voraussetzungen zur Verwendung von erneuerbaren Energien spezifisch für Inselregionen Europas zu verbessern. Zu diesem Zweck wurden Fallstudien zu den Anwendungsmöglichkeiten, dem Potenzial und den möglichen Szenarien für den vermehrten Einsatz von erneuerbaren Energien in Inselregionen durchgeführt.

Im EU-Projekt **MSG: Multi-user solar hybrid grids** [20] wurden an der Universität Zürich die sozialwissenschaftlichen Aspekte einer Solarstromversorgung in netzfernen Dörfern weiter verfolgt. Im Berichtsjahr wurde das Simulationsmodell zum sozialen Verhalten als Computer Software fertiggestellt. Es findet eine Wechselwirkung zwischen den physikalischen Daten (insbesondere Ladungszustand der Batterien) und dem sozialwissenschaftlichen Modell statt. Erste Resultate zeigen, dass das Simulationswerkzeug die Nutzung von Solarstromanlagen vor Ort reproduzieren kann.

INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT IEA, IEC, PV-GAP

Die Beteiligung am Photovoltaikprogramm der IEA (*IEA PVPS*) wurde im Berichtsjahr mit Kontinuität fortgesetzt, sowohl auf der Projektebene wie im Executive Committee (ExCo). Die Schweiz setzte im Berichtsjahr den Vorsitz dieses weltweiten Programms fort. Im Verlauf von 2002 wurde die 2. Phase des *IEA PVPS* Programms erfolgreich abgeschlossen: Über die 5 Jahre 1998 – 2002 dieser 2. Phase konnten insgesamt rund 50 Publikationen, Bücher und Datenbanken, 10 *PVPS*-Newsletter und die website www.iea-pvps.org publiziert sowie ca. 25 Veranstaltungen mit total ungefähr 1600 Teilnehmern durchgeführt werden. Dies belegt eine eindruckliche Bilanz dieses Programms zur internationalen Forschungszusammenarbeit [49]. Die Zusammenarbeit innerhalb *IEA PVPS* wird für weitere 5 Jahre fortgesetzt.

Nova Energie vertritt die Schweiz in Task 1 von *IEA PVPS*, welches allgemeine **Informationsaktivitäten** [21] zur Aufgabe hat. Im Berichtsjahr wurde ein weiterer **nationaler Bericht über die Photovoltaik in der Schweiz bis 2001** [50] erstellt; auf dieser Grundlage wurde die 7. Ausgabe des jährlichen **internationalen Berichtes über die Marktentwicklung der Photovoltaik in den IEA-Ländern** erstellt [51]. Dieser Bericht ist inzwischen eine vielzitierte Referenz über die Entwicklungen und Trends im Photovoltaik-Markt der IEA-Länder. Der **IEA PVPS-Newsletter** [52] informiert regelmässig über die Arbeiten in und rund um das IEA-Programm. Die Expertengruppe führte eines ihrer Projektmeetings in Basel durch, was den vermehrten Austausch von Erfahrungen insbesondere mit Schweizer Akteuren ermöglichte. Aktuelle Arbeiten befassen sich mit der Wertschöpfungskette Photovoltaik.

In Task 2 über **Betriebserfahrungen** [22] stellt *TNC* den Schweizer Beitrag. Die *PVPS*-Datenbank **Performance Database** [53] wurde mit neuen Daten ergänzt und umfasst nun 316 Photovoltaik-Anlagen aus 12 Ländern mit insgesamt mehr als 10'000 Monats-Betriebsdaten und 10.8 MWp Anlagenleistung (Fig. 7). Mit Hilfe der Datenbank werden einige spezifische Gebiete vertieft analysiert (Strahlungsdaten, Performance, Beschattungseffekte, Temperatureffekte und Zuverlässigkeit der Anlagen).

Dynatex beteiligt sich an den Arbeiten in Task 3 über **Inselanlagen** [16b]. 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 2002 wurden die Berichte zum Testen und dem Betrieb von Batterien [54, 55] sowie zu Anwendungsgeräten in Inselanlagen fertiggestellt [56].

Das ewz stellte zusammen mit *Enecolo* den Schweizer Beitrag in Task 5 zu technischen Fragen der **Netzankoppelung** [23] von Photovoltaik-Anlagen. Dieses Projekt wurde 2002 mit einer umfangreichen Reihe von neuen Schlussdokumenten, insbesondere auch zu sicherheitstechnischen Aspekten, abgeschlossen [57-63]. Ein besonders wichtiges Resultat dieser Zusammenarbeit bilden die Untersuchungen zur Inselbildung von PV-Anlagen in einem elektrischen Netz. Es konnte gezeigt werden, dass dieses unerwünschte Phänomen mit den gängigen Methoden unter allen Umständen eine sehr niedrige Eintretenswahrscheinlichkeit besitzt und damit kein wirkliches Problem darstellt. Task 5 konnte erfolgreich zeigen, wie durch die internationale Zusammenarbeit ein Konsens entstehen kann und auch für



Figur 7: IEA PVPS Task 2 Datenbank

nationale Praktiken sinnvolle Lösungen erarbeitet werden können.

Task 7 zur **Integration der Photovoltaik in den bebauten Raum** [13c] wurde von *Enecolo* betreut und ebenfalls mit einer reichen Auswahl von neuen Resultaten abgeschlossen [64-73]. Produkte und Anwendungen der Photovoltaik im bebauten Raum wurden in einer Datenbank zugänglich gemacht: www.pvdatabase.com. Task 7 kann für sich in Anspruch nehmen, das Thema der Photovoltaik-Gebäudeintegration sehr umfassend um viele Aspekte, sowohl technische wie nicht-technische, bereichert zu haben. Eine CD ROM mit Ausbildungsmaterial soll die PV-Gebäudeintegration den Architekten näher bringen (Fig. 8). Nach dem Abschluss dieses Projekts diskutiert das IEA PVPS-ExCo zur Zeit eine Fortsetzung der Thematik der Photovoltaik-Gebäudeintegration in einem neuen Task 10. Es wird erwartet, dass dieses Projekt im Verlauf von 2003 formalisiert werden kann.

Im Rahmen des Projektes *Drehscheibe Photovoltaik Entwicklungszusammenarbeit PV EZA* leistet *Entec* mit Unterstützung des Staatssekretariats für Wirtschaft (seco) den Schweizer Beitrag zu Task 9 über die **Photovoltaik-Entwicklungszusammenarbeit** [24a]. Die Schweiz ist in diesem Projekt für die Koordination der Arbeiten mit multilateralen und bilateralen Organisationen verantwortlich. Ein erster Bericht zu verschiedenen Finanzierungsmechanismen für *solar home systems* in Entwicklungsländern [74] konnte termingerecht für das Herbsttreffen von Task 9 fertiggestellt werden. Dieses Treffen wurde in St. Gallen durchgeführt und diente als Anlass für einen 2. nationalen Workshop zum Thema Photovoltaik in



Figur 8: Bildschirm der CD ROM von IEA PVPS Task 7 mit Ausbildungsmaterial für Architekten

der Entwicklungszusammenarbeit. Damit konnte der Erfahrungsaustausch zwischen Schweizer Akteuren und der internationalen Expertengruppe vertieft werden. Verschiedene weitere Berichte von Task 9 werden demnächst fertiggestellt. 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 mit Unterstützung des BUWAL statt.

Alpha Real vertritt die Schweiz im TC 82 der IEC und leitet die Arbeitsgruppe, welche internationale **Normenvorschläge** [25a] 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 werden im EU-Altener-Projekt **Quality is the key to the market** [25b] bearbeitet.

Ein neues EU-Projekt **PV-EC-NET** [24b] bindet die nationalen PV-Programmkoordinationsstellen von 14 Ländern in ein Netzwerk (www.pv-ec.net) ein mit dem Ziel, den Informationsaustausch zu den PV-Programmen zu vertiefen, die Programm-erfahrungen zu vergleichen und die zum Teil fragmentierte europäische Forschung auch in diesem Bereich verstärkt zu koordinieren und damit kohärenter zu machen. Das Projekt ist als Initiative in Hinsicht auf den europäischen Forschungsraum zu verstehen.

Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr wurde die vielfältige nationale Zusammenarbeit anlässlich von Projekten und Veranstaltungen weiter gepflegt. Die Zusammenarbeit mit privaten Unternehmen konnte intensiviert werden und das Interesse an der Photovoltaik hält auch bei einem gedämpften Schweizer Markt an. Ein grosser Erfolg war der nationalen Photovoltaiktagung in Lugano im Mai 2002 beschieden. Diese Tagung erzielte eine Rekordbeteiligung von ca. 200 Personen und war damit eine gute Gelegenheit, um die gemeinsamen Interessen der Photovoltaik in der Schweiz, den

nationalen Austausch und die Zusammenarbeit zu fördern [75].

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 erlauben die immer wichtiger werdende breite Abstützung des Programms.

Internationale Zusammenarbeit

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 2002 waren es 14 Projekte im Rahmen von *DG Research* und 5 Projekte im Rahmen der *DG Transport & Energy* der EU. Weitere Projekte finden in den Programmen *IST* und *Altener* der EU statt. Leider wurde die Ratifizierung der bilateralen Verträge mit der EU so lange verzögert, dass die erhoffte Besserstellung von Schweizer Partnern in EU-Projekten im 5. Rahmenforschungsprogramm nicht mehr wirksam wurde

und für das 6. Rahmenforschungsprogramm neu ausgehandelt werden muss. Wie bisher erfolgte deshalb die Unterstützung dieser Projekte in der Schweiz durch das Bundesamt für Bildung und Wissenschaft. Mit den verantwortlichen Stellen in Brüssel wird dennoch ein intensiver Austausch gepflegt. Mittlerweile ist die Schweiz auch wieder in den Gremien der verschiedenen Programme vertreten. Weitere Kontakte wurden mit internationalen Stellen mit Bedeutung für die Entwicklungszusammenarbeit gepflegt (Weltbank, GEF, IFC, UNDP, GTZ, KfW u.a.). Auch unter den gegenwärtigen Verhältnissen im Schweizer Markt ist die Schweizer Photovoltaik angesichts dieser zahlreichen Wechselwirkungen international sehr präsent.

Pilot- und Demonstrationsprojekte (Auswahl)

Insgesamt waren im Jahr 2002 im Photovoltaik P+D Bereich wiederum rund 45 Projekte aktiv. Die P+D-Aktivitäten verteilten sich auf die Sektoren Pilotanlagen, Studien und Hilfsmittel, Komponentenentwicklung und Messkampagnen. Die pilotmässige Erprobung neuer Komponenten bei P+D-Anlagen im Massstab 1:1 blieb von grossem Interesse und bildet auch dieses Jahr einen klaren Schwerpunkt. Weiterhin stark vertreten ist die **Photovoltaik-Gebäudeintegration**. Die andern Projekte verteilten sich auf die Bereiche PV-Schallschutz, frei aufgestellte Anlagen, Messungen zu diversen Anlagen, Qualitätssicherung und PV-Planungshilfsmittel. Im folgenden wird eine Auswahl der wichtigsten Projekte und Resultate zusammengefasst.

NEUE P+D-PROJEKTE

Im Jahr 2002 wurden 10 neue P+D-Projekte begonnen. Der grösste Teil dieser Projekte befasst sich mit der Thematik Photovoltaik-Anlagen im bebauten Raum, wobei das **PV-Dach Freestyle® in Lutry** [26] (Fig. 9) einen hohen Integrationsgrad von Silizium Dünnschicht-Solarzellen erreicht. Die zunehmende Anzahl von Projekten, die sich mit der PV-Dünnschichttechnologie befassen, unterstreicht das steigende Interesse der PV Gebäudeintegration an dieser Technologie. Gespannt sein darf man in nächster Zeit sicher auf die Resultate der Messungen an 18 Testanlagen mit Dünnschichtzellen-Modulen im Projekt **DünFilmTest** [27] (Fig. 10) in Zürich.



Figur 9: Montage der PV Dachintegration mit amorphen Tripelzellen «Freestyle®» in Lutry (Bildquelle: Solstis)



Figur 10: 18 Testanlagen mit Dünnschichtzellen im direkten Vergleich, Migros, Zürich (Bildquelle: NET AG)

LAUFENDE P+D-PROJEKTE

Von den laufenden Projekten wurden wie schon im Jahr 2001 auch im Berichtsjahr wieder verschiedene Projekte mit Solarpreisen geehrt. Mit dem Gewinn des Europäischen Solarpreis 2002 in der Kategorie *Solares Bauen* und dem Gewinn des Schweizer Solarpreises 2002 in der Kategorie *Bestintegrierte Anlagen* wurde das 6-Familienhaus **Sunny Woods** [28] (Fig. 11) gleich doppelt für das vorbildliche und integrale Gesamtkonzept im Architektur- und Energiebereich ausgezeichnet.

Die **Photovoltaik-Integration Dock Midfield, Flughafen Zürich** [29] (Titelbild) wird als multifunktionale, umfassend ins Gebäude integrierte PV-Beschattungsanlage höchsten architektonischen Ansprüchen gerecht und wurde in der Kategorie *Bestintegrierte Anlagen* ebenfalls mit dem Schweizer Solarpreis 2002 ausgezeichnet.

Als dritte Anlage der laufenden P+D-Projekte konnte auch das PV-Dach des Parking P+R de



Figur 11: Photovoltaik Dachintegration Sunny Woods Zürich (Bildquelle: Architekturbüro Beat Kämpfen)



Figur 12: Dachintegrationen Parking de l'étoile Genf (Bildquelle: Sunwatt Bio Energie SA)

l'Etoile in Genf (Projekt **Photocampa**) [30] (Fig. 12) in den Kategorie, *beste Photovoltaik-Anlagen* einen der begehrten Solarpreise 2002 für sich verbuchen.

Der **Solar-Katamaran Mobicat** [31] (Fig. 13), ein Passagierschiff mit Platz für 150 Personen, kann auf eine erfolgreiche Saison 2002 zurückblicken. In den letzten zwei Jahren wurden mit diesem Schiff über 4'000 km zurückgelegt und um die 10'000 Passagiere befördert. Bis jetzt wurde das Schiff vor allem im Charterbetrieb eingesetzt und war dabei sehr begehrt. Für die Saison 2003 sind von der *Bielersee-Schiffahrts-Gesellschaft BSG* neu auch regelmässig Publikumsfahrten vorgesehen.

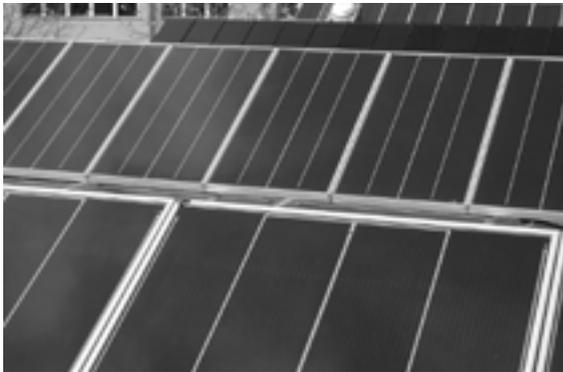
Die **10 kWp Solgreen Anlage** [32] (Fig. 14) in Chur kombinierte nicht nur Photovoltaik und Gründach vorbildlich, sie erreichte auch den ungewöhnlich hohen Ertrag von 1222 kWh/kWp. Anhand der Messungen ist davon auszugehen, dass die gelieferten Module im positiven Bereich der Leistungstoleranz liegen!



Figur 13: Solar Katamaran Mobicat
(Bildquelle: NET AG)



Figur 14: Solgreen Anlage Chur
(Bildquelle: ars solaris hächler)



Figur 15: 3x1 kWp Testanlagen Newtech Burgdorf
(Bildquelle: NET AG)



Figur 16: Solgreen Kraftwerk 1 Zürich
(Bildquelle: NET AG)

Bezüglich guter Erträge konnten verschiedene Anlagen mit Dünnschichtzellen-Modulen überdurchschnittliche Resultate erreichen. Nicht unerwartet produzierte die **16,8 kWp Anlage mit CIS Modulen in St. Moritz** [33] 1055 kWh/kWp. Überraschend wiesen im gleichen Zeitraum Module mit der gleichen CIS Technologie im Projekt **Newtech** [34] in Burgdorf einen Ertrag von 1091 kWh/kWp aus (Fig. 15). Im Rahmen des gleichen Projekts erreichte auch die Anlage mit amorphen Silizium Tripelzellen den überdurchschnittlichen Wert von 1033 kWh/kWp.

An der **25 kWp Anlage Kraftwerk 1 in Zürich** [35a] (Fig. 16) wird auf der Grundlage von Solgreen eine neu entwickelte Modul-Haltekonstruktion für den Gründachbereich erprobt und auch hinsichtlich der Vegetationsentwicklung beobachtet.

Insgesamt weist eine hohe Anzahl der laufenden P+D-Projekte bemerkenswerte Erfolge auf, die als nächster Schritt in möglichst in grossem Umfang praxisbezogen umzusetzen sind.

IM JAHR 2002 ABGESCHLOSSENE PROJEKTE

Im Jahr 2002 wurden die folgenden P+D-Projekte abgeschlossen:

Anlagen

- ◆ **260 kWp PV-Anlage ausgerüstet mit LonWorks Feldbus-Wechselrichtern** (pilotmässiger Einsatz von 68 PV Wechselrichter mit LON-Knoten für den Datenaustausch und die Überwachung der Anlage; Leitung: *Sputnik Engineering AG*) [36]
- ◆ **Drei 10 kWp Photovoltaik-Schallschutzanlagen** entlang der Autobahn (Kombination Photovoltaik-Schallschutz, 3 Prototyp-Anlagen; Leitung: *TNC Consulting*) [37]
- ◆ **Miet-Solarboot Zholar** auf dem Zürichsee (6-plätziger Elektrokatamaran mit einer integrierten autonomen 730 Wp Photovoltaik-Anlage für die elektrische Energieversorgung des Antriebs; Leitung: *SSES Regionalgruppe Zürich*) [38]

- ◆ **Héliotram, 800 kWp PV-Anlagen Lausanne/Genf** mit DC-Direkteinspeisung ins Tramnetz (Leitung: *Sunwatt Bio Energie SA*) [39]

Komponentenentwicklung

- ◆ **Modulaufständerung SOLight** (leichte Unterkonstruktion für Flachdachanlagen; Leitung: *Energiebüro*) [40]
- ◆ **Optimierung System Solgreen** (Systemoptimierung in Bezug auf Kosten, Montagefreundlichkeit und Material, Gebäudeintegration; Leitung: *Enecolo AG*) [35b]
- ◆ **Solardachziefer Sunplicity** (Entwicklung eines PV-Dachschiefers unter Berücksichtigung von hoher Robustheit, Alterungsbe-

ständigkeit, einfacher Montage und einfacher Verkabelung, Gebäudeintegration; Leitung: *Alpha Real AG*) [41]

Messkampagnen

- ◆ **Visualisierung und Auswertung der PV-Anlage auf dem Rothorn** (Leitung: *HTA Chur*) [42]
- ◆ **1 Megawatt Solarkette der NOK** (normierte Daten 1997 - 2001; Leitung *Axpo*) [43]

Studien – Hilfsmittel – diverse Projekte

- ◆ **PV City Guide:** internationale Arbeiten, allgemeiner Schlussbericht (Realisierungen von PV-Anlagen im städtischen Raum; Leitung Schweizer Beitrag: *NET AG*) [44]

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Der **weltweite Photovoltaikmarkt** boomt aufgrund grossangelegter Förderprogramme bzw. Einspeisevergütungen einzelner Länder mit Wachstumsraten zwischen 30 und 40%. Demgegenüber war der schweizerische Photovoltaik-Markt im Jahr 2002 nicht verwöhnt aber er konnte sich dank den Solarstrombörsen immerhin auf den Vorjahreswerten halten. Die länderspezifischen Photovoltaik-Marktdaten von *IEA PVPS* zeigen, dass die Schweiz damit 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.

Das weltweite Wachstum des Photovoltaik-Marktes führt auch in der Schweiz und trotz einem gedämpften Heimmarkt dazu, dass sich die **Industrie** zunehmend für die Photovoltaik interessiert. Die Photovoltaik wird als Zukunftsoption wahrgenommen, welche inskünftig interessante Wachstums- und Diversifikationsoptionen darstellen kann. Es ist deshalb ermutigend, festzustellen, dass die Investitionen der Industrie in Forschung und Entwicklung der Photovoltaik – als Beispiel sei hier *Unaxis* aufgeführt – deutlich zunehmen. Diese Entwicklung belegt, dass das Rollenverständnis und die Aufgabenteilung zwischen der öffentlichen Hand und der Privatwirtschaft ihre Wirkung zeigen, indem aktuelle Forschungsergebnisse vermehrt in industrielle Aktivitäten und Produkte umgesetzt werden. Die Möglichkeiten für den Export von Dienstleistungen und Produkten sind angesichts des vorhandenen und anerkannten Know-hows weiter zu entwickeln.

Durch die breite Abstützung des **Programms Photovoltaik** konnte die Anzahl der Projekte und die eingesetzten Mittel der öffentlichen Hand trotz der angespannten Finanzlage gehalten werden. Dazu haben EU-Projekte mit Unterstützung des Bundesamtes für Bildung und Wissenschaft ebenso beigetragen, wie die Kommission für Technologie und Innovation. Die gute Vernetzung des Programms und seiner Akteure, sowohl national wie international, ist dabei eine wichtige Voraussetzung, welcher weiterhin grosse Beachtung geschenkt wird.

Eine ebenso wichtige Rolle spielt der anhaltende **Informationsaustausch** und das Erreichen von neuen Zielgruppen. Hierzu soll die Photovoltaik website www.photovoltai.ch weiter ausgebaut werden. Als wichtige Veranstaltungen finden im Jahr 2003 das *18. Symposium für Photovoltaische Solarenergie* in Staffelstein (12.-14. März 2003), die *3. Photovoltaik Weltkonferenz* in Osaka (12.-16. Mai 2003), die *IEA PVPS-Konferenz* in Osaka (19.-20. Mai 2003) statt.

Die bisherigen Bestrebungen des Programms zur Umsetzung der Forschungsergebnisse werden auch im Jahr 2003 unter Mitwirkung aller Akteure zielgerichtet und koordiniert weitergeführt. Von besonderer Bedeutung wird u.a. sein, wie sich die ersten Ausschreibungen im 6. Rahmenforschungsprogramm der EU auswirken werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

Einzelne Jahresberichte können von www.photovoltaic.ch heruntergeladen werden

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

Unter den aufgeführten Internet-Adressen können weiter Informationen heruntergeladen werden

- [1] A. Shah, (arvind.shah@unine.ch), IMT, UNI-Neuchâtel, *Neuchâtel: a) IMT 2000 - 2002 Technologische Weiterentwicklung der mikromorphen Solarzellen* (JB, SB) ENET: 230049 ♦ *b) DOIT: Development of an optimized integrated thin film silicon solar module* (JB) ♦ *c) Optical nano gratings for nano crystalline silicon solar cell* (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://crppwww.epfl.ch/crpp_proc.htm
- [3] D. Fischer, (info@vhf-technologies.com), VHF-Technologies, *Le Locle: a) Aufrauen von Polymer Substraten (gezieltes Aufrauen von Plastikfolien für ein effizientes Light-Trapping in amorphen Solarzellen)* (JB) ♦ *b) Photoactive Composite Module* (JB) / <http://vhf-technologies.com>
- [4] B. Bitnar, (Bernd.Bitnar@psi.ch), PSI, *Villigen: a) Thermophotovoltaik* (JB, SB) ENET: 230048 W. Durisch, (wilhelm.durisch@psi.ch), PSI, *Villigen: ♦ b) PV-Pro-Test-Datenbank – Energieertrag Output of PV-Modules* (JB) *c) Heizkessel für elektrisch-autarken Betrieb mittels thermophotovoltaischem Generator (HEAT)* / <http://www.psi.ch>
- [5] 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/>
- [6] A.N. Tiwari, (tiwari@phys.ethz.ch), IQE, ETH, *Zürich: a) PROCIS: Production of large are CIS modules* (JB) ♦ *b) NANOCIS: Nanomaterials for high efficiency and low cost Cu (In,Ga) Se2 thin film solar cells - TOP NANO 21* (JB) / <http://www.tfp.ethz.ch/>
- [7] 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) Outdoor measurements of new technology solar cells* (JB) ♦ *d) NANOMAX - dye-sensitised nanocrystalline solar cells having maximum performance* (JB) / <http://dcwww.epfl.ch/icp/ICP-2/icp-2.html>
- [8] G. Calzaferri, (gion.calzaferri@iac.unibe.ch), UNI, *Bern: Photochemische, Photoelektrochemische und Photovoltaische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie* (JB) / <http://iacrs1.unibe.ch>
- [9] P. Hofer, (ho@3-s.ch), 3S, *Bern: a) HIPERB: High performance photovoltaics in buildings* (JB) ♦ *b) AFRODITE Advanced Façade and Roof Elements Key to Large Scale Building Integration of Photovoltaic Energy* (JB) / <http://www.3-s.ch/>
- [10] 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
- [11] W. Lohwasser, (Wolfgang.Lohwasser@alcan.com), ALCAN PACKAGING SERVICES, *Neuhausen: HIPROLOCO High productivity and low cost for the encapsulations of thin film solar* / http://www.alcanpackaging.com/about/eng/about_rd.php
- [12] Ch. Roecker, (christian.roecker@epfl.ch), LESO / EPFL, *Lausanne: Demosite 2000 - 2002, Demosite (phase IV)* (JB, SB) / www.demosite.ch, <http://lesomail.epfl.ch/> ENET: 230047
- [13] P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), ENECOLO, *Mönchaltorf: a) EnerBuild RTD: Energy in the built environment* (JB) / <http://www.enerbuild.net> ♦ *b) Energy Rating of Solar Modules Workshop March 22, 2002 in Zürich* (JB) ♦ *c) IEA PVPS Task 7: Photovoltaic Power Systems in the Built Environment* (JB, SB), ENET: 220329 / <http://www.solarstrom.ch>

- [14] D. Chianese, (domenico.chianese@dct.supsi.ch), LEEE, SUPSI - DCT, *Canobbio*: **a) Qualità e resa energetica di moduli ed impianti PV TISO - periodo VI: 2000-2002 (JB) ♦ b) Mean Time Before Failure of Photovoltaic modules (MTBF-PVm)** (JB) / <http://leee.dct.supsi.ch>
- [15] H. Häberlin, (heinrich.haeberlin@hta-bu.bfh.ch), HTA, *Burgdorf*: **Langzeitverhalten von netzgekoppelten PV-Anlagen 2** (JB) / <http://www.hta-bu.bfh.ch/e/pv/pv-indd.htm>
- [16] 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)
- [17] S. Kunz, (remund@meteotest.ch), METEOTEST, *Bern*: **SoDa: Integration and Exploitation of networked Solar Radiation Databases** (JB) / <http://soda.jrc.it> , <http://www.meteotest.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) / <http://www.unige.ch/cuepe/>
- [19] F. Foradini, (flavio.foradini@e4tech.com), E4TECH, *Lausanne*: **EURO-ISLAS: New and renewable energy sources for islands and remote regions** (SB) / <http://www.e4tech.com/>
- [20] H.-J. Mosler, (mosler@sozpsy.unizh.ch), UNIVERSITÄT, *Zürich*: **MSG: Combined project on multi-user solar hybrid grids** (JB) / <http://www.sozpsy.unizh.ch/sozpsy-gutscher.html>
- [21] P. Hüsser, (pilus.huesser@novaenergie.ch), NOVA ENERGIE, *Aarau*: **Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Programm, Task 1** (JB) / <http://www.novaenergie.ch/>
- [22] Th. Nordmann, (nordmann@tnc.ch), TNC CONSULTING, *Erlenbach*: **Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Programm, Task 2** (JB) / <http://www.tnc.ch>
- [23] S. Taiana, (sergio.taiana@ewz.stzh.ch), EWZ, *Zürich*: **IEA PVPS Task 5: Grid Interconnection of Building- Integrated and other dispersed Photovoltaic Power Systems** (JB, SB) / <http://www.ewz.ch/>, ENET: 220330
- [24] S. Nowak, (stefan.nowak@netenergy.ch), NET, *St. Ursen* / A. Arter (alex.arter@entec.ch), ENTEC, *St. Gallen*: **a) Swiss Platform PV Development Cooperation and Contribution to IEA PVPS Task 9 (JB) ♦ b) PV-EC-NET - Thematic Network for Co-ordination of European and National RTD Programmes on Photovoltaic Solar Energy** (JB) / <http://www.photovoltaic.ch>
- [25] M. Real, (alphareal@access.ch), ALPHA REAL, *Zürich*: **a) IEC Normenarbeit für PV Systeme (JB) ♦ b) Quality is the Key of the PV Market - accreditation / certification** (JB)

Liste der P+D-Projekte (Auswahl)

- [26] P. Affolter, (Pascal.affolter@solstis.ch), SOLSTIS, *Lausanne*: **Toiture photovoltaïque Freestyle de 5,5 kWp à Lutry** (JB) / www.solstis.ch
- [27] R. Frei, (info@energieburo.ch), ENERGIEBÜRO, *Zürich*: **PV-ThinFilmTest** (JB) / www.energieburo.ch
- [28] B. Kämpfen, (info@kaempfen.com), BÜRO FÜR ARCHITEKTUR KÄMPFEN, *Zürich* / R. Naef, (naef@igjzh.com), NAEF ENERGIETECHNIK, *Zürich*: **Sunny Woods - Photovoltaik-Anlage in Blechdach integriert** (JB) / <http://www.kaempfen.com/>
- [29] M. Hubuch, (m.hubbuch@hsw.ch), HOCHSCHULE WÄDENWIL / Th. Gautschi (thomas.gautschi@amstein-walthert.ch), ARGE ZAYETTA, *Zürich*: **PV Anlage Dock Midfield Zürich Flughafen** (JB)
- [30] A. Main, (parkingsolaire@windwatt.ch), WINDWATT, *Genève* / M. Schneider (schneiderm@bluewin.ch), SUNWATT BIO ENERGIE, *Chêne Bourg*: **PHOTOCAMPA - PV grid connected system in parking and roof - parking P+R de l'Etoile, aéroport de Zurich, école de cirque, école de Lullier** (JB) / (<http://www.windwatt.ch>)
- [31] R. Minder, (rudolf.minder@bluewin.ch), MINDER ENERGY CONSULTING, *Oberlunkhofen*: **SolarCat – Solar - Electric Passenger Ship** (JB) / <http://www.minder-energy.ch>

- [32] R. Hächler, (ars_solaris@freesurf.ch), ARS SOLARIS HÄCHLER, Chur: **Pilot installation 10 kWp Flat Roof System «SOLGREEN»** (JB, SB)
- [33] N. Cereghetti, (nerio.cereghetti@dct.supsi.ch), TISO, Canobbio / F. Stöckli, RÄTIA ENERGIE, Poschiavo: **Monitoring of the 16.8 kWp PV-plant with CIS modules in St. Moritz** (JB) / www.leeedct.supsi.ch
- [34] Ch. Renken, (heinrich.haeberlin@hta-bu.bfh.ch), ADEV BURG DORF REPRESENTED BY BERNER FACHHOCHSCHULE HTA, Burgdorf: **Newtech, Vergleich 3 x 1 kWp Dünnschichtzellenanlagen** (JB) / www.pvtest.ch
- [35] P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), ENECOLO, Mönchaltorf: **a) Solgreen Kraftwerk 1 Zürich** (JB) • **b) SOLGREEN- PV Anlagen auf Gründächern** (JB, SB) / <http://www.solarstrom.ch>
- [36] Ch. von Bergen, (sputnik@solarmax.com), SPUTNIK ENGINEERING, Nidau: **LonWorks as Field-bus for PV-Installations** (JB, SB) / <http://www.solarmax.com>
- [37] Th. Nordmann, (info@enecolo.ch), TNC CONSULTING, Erlenbach: **Three pilot 10 kWp integrated PV sound barrier fields** (JB, SB) / <http://www.tnc.ch>, ENET: 220264
- [38] R. Schmid, (roli.schmid@gmx.ch), SSES REGIONALGRUPPE, Zürich: **Zholar, Mietsolarboot auf dem Zürichsee** (SB) / www.sses.ch/zuerich/solarboot, ENET: 220215
- [39] M. Schneider, (schneider-m@bluwin.ch), SUNWATT BIO ENERGIE, Chêne Bourg: **HELIOTRAM: 800 kWp PV power plants for direct injection in light train low voltage D.C. networks**
- [40] Ch. Meier, (christian.meier@energieburo.ch), ENERGIEBÜRO, Zürich: **New Light-Weight Flat Roof Photovoltaic Module Mounting System** (JB, SB) / <http://www.energieburo.ch>
- [41] M. Real, (alphareal@access.ch), ALPHA REAL, Zürich: **Solar roof shingle Sunplicity** (JB)
- [42] M. Schalcher, (Max.Schalcher@fh-htwchur.ch), INGENIEURSCHULE HTA, Chur: **Visualisation and Analysis of the Data of the 4,1kWp PV-Power Plant Rothorn** (SB) / www.fh-htachur.ch, ENET: 220150
- [43] S. Roth, (stefan.roth@axpo.ch), AXPO, Zürich: **NOK's 1-Megawatt Solar Chain, Normalized Data 1997 to 2001** (SB) / <http://www.axpo.ch>, ENET 220184
- [44] S. Nowak, (stefan.nowak@netenergy.ch), NET, St. Ursen: **PV City Guide** (SB) / <http://pvcityguide.energyprojects.net>, ENET: 230046

Referenzen

- [45] **Forschungskonzept Photovoltaik 2000 – 2003**, Bundesamt für Energie, 2001, <http://www.photovoltaic.ch>
- [46] **Sustainable Technologies International STI**, Queanbeyan NSW Australia, <http://www.sta.com.au/>
- [47] **Meteonorm 4.1, Global Meteorological Database for Solar Energy and Applied Meteorology**, <http://www.meteotest.ch>
- [48] **European Solar Radiation Atlas ESRA**, <http://www.helioclim.org/esra/>
- [49] **Annual Report 2002**, IEA PVPS, 2002, <http://www.iea-pvps.org/>
- [50] **National Survey Report on PV Power Applications in Switzerland 2001**, P. Hüssler, (pius.huessler@novaenergie.ch), Nova Energie, June 2002
- [51] **Trends in Photovoltaic Applications in selected IEA countries between 1992 and 2001**, IEA PVPS Task 1 – 11: 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [52] **IEA PVPS Newsletter**, zu beziehen bei Nova Energie, Schachenallee 29, 5000 Aarau, Fax 062 834 03 23, (pius.huessler@novaenergie.ch)
- [53] **Performance Database**, IEA PVPS Task 2, Version 1.19, July 2001, <http://www.task2.org>
- [54] **Testing of batteries used in Stand Alone PV Power Supply Systems**, IEA PVPS T3-11: 2002, October 2002, <http://www.iea-pvps.org>

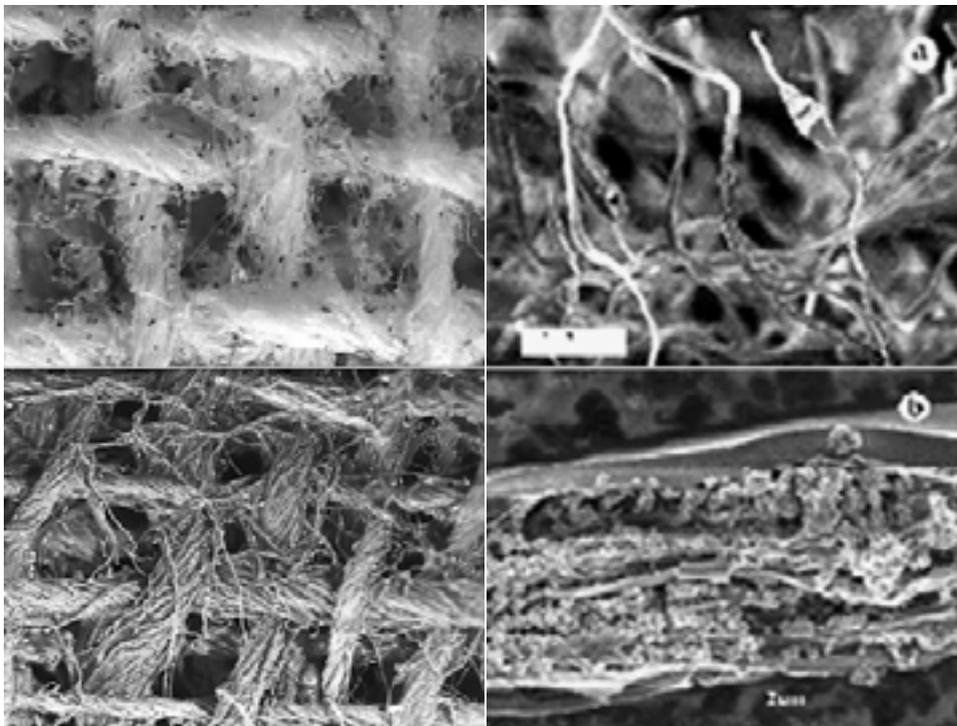
- [55] **Management of batteries used in Stand Alone PV Power supply systems**, IEA PVPS T3-10: 2002, December 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [56] **Use of Appliances in Stand Alone PV Power supply systems**, IEA PVPS T3-9: 2002, September 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [57] **Grid-connected PV power systems: survey of inverter and related protection equipments**, IEA-PVPS T5-05: 2002, February 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [58] **International guideline for the certification of photovoltaic system components and grid-connected systems**, IEA-PVPS T5-06: 2002, February 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [59] **Probability of islanding in utility networks due to grid connected photovoltaic power systems**, IEA-PVPS T5-07: 2002, February 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [60] **Risk analysis of islanding of photovoltaic power systems within low voltage distribution networks**, IEA-PVPS T5-08: 2002, February 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [61] **Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility-interaction power systems**, IEA-PVPS T5-09: 2002, February 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [62] **Impacts of power penetration from photovoltaic power systems in distribution networks**, IEA-PVPS T5-10: 2002, February 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [63] **Grid-connected photovoltaic power systems: power value and capacity value of PV systems**, IEA-PVPS T5-11: 2002, February 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [64] **Potential for Building Integrated Photovoltaics**, IEA PVPS T7-04: 2001, <http://www.iea-pvps.org>
- [65] **Guidelines for the Economic Evaluation of Building Integrated Photovoltaics**, IEA PVPS T7-05: 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [66] **Market Deployment Strategies for Photovoltaics in the Built Environment**, IEA-PVPS T7-06: 2002, September 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [67] **Innovative electrical concepts**, IEA-PVPS T7-07:2001, <http://www.iea-pvps.org>
- [68] **Reliability Study of Grid Photovoltaic Systems**, IEA-PVPS T7-08: 2002, March 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [69] **L'integrazione architettonica del fotovoltaico esperienze compiute**, IEA PVPS Task 7, September 2002, Gangemi Editore
- [70] **PV/Thermal Solar Energy Systems, Status of the Technology and Roadmap for future Development**, IEA-PVPS T7-10, <http://www.iea-pvps.org>
- [71] **Executive Summary Report - Non-technical Barriers to the commercialisation of Photovoltaic Power in the Built Environment**, IEA-PVPS T7-10, <http://www.iea-pvps.org>
- [72] **Education & training material for architects CD**, IEA PVPS Task 7, Novem (NL), zu beziehen bei ENET, www.energieforschung.ch, ENET: 220209
- [73] **Designing with Solar Power - A source book for Building Integrated PV**, The Images Publishing Goup, www.imagespublishinggroup.com
- [74] **Financing Mechanisms for Solar Home Systems in Developing Countries**, IEA PVPS T9-01:2002, September 2002, <http://www.iea-pvps.org>
- [75] **Nationale Photovoltaiktagung 2002**, SUPSI, Lugano, Mai 2002, Unterlagen zu beziehen bei NET, Waldweg 8, 1717 St. Ursen, info@photovoltaic.

SOLARCHEMIE / WASSERSTOFF

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2002

Armin Reller

armin.reller@physik.uni-augsburg.de



Strukturiertes Titanoxidgewebe als formbeständiger Katalysator für photoelektrochemische Reaktionen

Mit neuartigen Synthesemethoden gelingt es, Funktionsmaterialien direkt in gewünschten makroskopischen Formen herzustellen, wobei mikroskopische und nanoskopische Eigenschaften beibehalten werden. Die Licht- (links) und Rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (rechts) zeigen reines (farblos) und mit Eisen dotiertes (gelb) Titanoxidgewebe zur photokatalytischen Spaltung von Wasser oder zur Detoxifikation von Wasser mittels Solarstrahlung.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Programm *Solarchemie / Wasserstoff* gliedert sich in drei Schwerpunkte: Wasserstofftechnologie, solare Prozesswärme und unterstützende Technologien. Im **Schwerpunkt Wasserstofftechnologie** wird angestrebt, solare Strahlungsenergie unterschiedlicher Konzentration mittels optischer, thermischer, mechanischer und photokatalytischer Prozesse möglichst effizient zu sammeln und in Nutzenergie oder speicherbare Energieträger, insbesondere Wasserstoff, umzuwandeln. Der sekundäre Energieträger Wasserstoff weist ein grosses Zukunftspotential auf. Es wurden deshalb zusätzliche, regenerative und technisch realisierbare Herstellungsweisen erforscht und entwickelt, insbesondere die elektrolytische, die photokatalytische sowie die solarthermische Spaltung von Wasser. Es wurde auch abgeklärt, inwiefern Wasserstoff aus Biomasse oder aus der Dekarbonisierung fossiler Energieträger gewonnen werden kann. Neben der Herstellung wurde vor allem auch die sichere chemische und physikalische Speicherung von Wasserstoff 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 das im Vorjahr gegründete, nun operative schweizerische Wasserstoff-Kompetenzzentrum *HYDROPOLE* angestrebt. Diese BfE-Tochter soll als Koordinationsstelle und Informationsplattform für die Wasserstofftechnologie, und damit für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft agieren.

Als zweiter Schwerpunkt wurde die **Bereitstellung von solarer Prozesswärme** in unterschied-

lichen Temperaturbereichen und entsprechend unterschiedlichen Nutzungspotentialen vorangetrieben. Für effiziente Absorbersysteme bis in den Mitteltemperaturbereich wurden schichtartig aufgebaute Materialien mit selektiven Absorptionseigenschaften entwickelt. Im Hochtemperaturbereich wurde neben den obengenannten Prozessen zur Herstellung von Wasserstoff das Brennen von Kalk sowie das Verglasen, d.h. das Immobilisieren, von Schwermetallen und anderen toxischen Reststoffen in einer kostengünstigen und chemisch inerten Keramikmatrix untersucht. Diese solaren Hochtemperaturprozesse sollen für die Reduktion von Kohlendioxidemissionen sowie für die immer bedeutender werdende Kreislaufwirtschaft von Materialien einen entscheidenden Beitrag leisten. Die Bereitstellung massgeschneiderter Funktionsmaterialien für regenerative Energietechnologien sollen insgesamt verstärkt werden, d.h. es soll vermehrt versucht werden, den untersuchten Energiesystemen innovative und ökonomisch sowie ökologisch effiziente Materialkonzepte bzw. Materialanwendungen zugrunde zu legen.

In einem dritten Schwerpunkt wurden - meistens im Rahmen von P+D-Projekten - **unterstützende und innovative Technologien** konzipiert und getestet. Zu diesen Vorhaben gehören die Optimierung von Flüssig-Lichtleitern, die katalytische Synthese organischer Grundchemikalien in überkritischem Kohlendioxid, sowie die vielversprechende Entwicklung von Druckluft-Energiespeichersystemen. Diese Aktivitäten verfolgen das Ziel, neue Trends und Potentiale für regenerative Energietechnologien frühzeitig aufzugreifen und hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit zu prüfen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

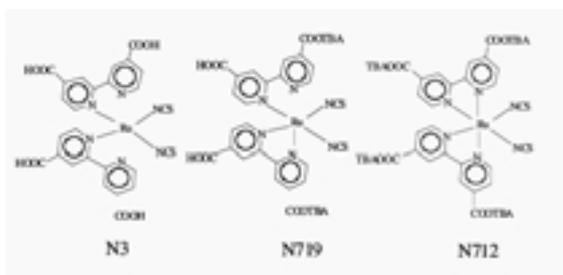
WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Photokatalytische Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff

Die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff bei Umgebungstemperaturen mit Hilfe von Photokatalysatoren gehört zu den attraktiven und seit geraumer Zeit im Programm intensiv und erfolgreich entwickelten Energieumwandlungen. Um einen möglichst hohen Anteil der (nicht konzentrierten) Sonnenstrahlung nutzen zu können,

bedarf es optimierter, wellenlängenselektiver Elektrodenmaterialien und möglichst aktiver Katalysatoren. Im Forschungsverbund zwischen der Universität Bern, der EPFL Lausanne und der Université de Genève werden in den 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] derartige Photoelektroden-Materialien erforscht und zu funktionstüchtigen Systemen vereinigt. Bezüglich Effizienz, Selektivität und chemischer Inertheit, d.h. Alterungsbeständigkeit, wurden erhebliche Fortschritte erzielt. So gelang es im erstgenannten Projekt, die Eigenschaften einer Silberchlorid/Silberionen-Photoanode zur Oxidation von Sauerstoff weiter zu verbessern, indem auf einem aufgerauten (sandgestrahlten) leitenden Zinnoxidglas zuerst eine Nanoschicht Gold und darauf die Silberchlorid-Schicht abgeschieden werden. Die über mehrere Jahre zusammengetragene Materialkompetenz erlaubte es auch, die Entwicklung von photovoltaischen Dünnschichtzellen erfolgreich weiter zu führen. Dieses System basiert auf im molekularen Bereich optimal abgestimmten Funktionsmaterialien: organische, molekulare Photosensibilisatoren, die in einer Zeolithmatrix dank optimaler Orientierung auf einem Halbleitersubstrat solare Strahlung effizient in elektrischen Strom umzuwandeln vermögen. Die Qualität der bisher den beiden anderen Projekten eingesetzten Wolframoxid-, Titanoxid- und Eisenoxid-Elektrodenmaterialien konnte vor allem in Bezug auf die notwendige Herstellung von dünnen Filmen verbessert werden (mit Eisenoxid als Photoanode konnten Ströme von 4 – 6 mA/cm² erzeugt werden). Dies gelang durch die Verwendung ausgewählter Vorläuferverbindungen der entsprechenden Metalloxide und durch die kontrollierte thermische Umwandlung in die Anodenphasen. Die Palette der als Photosensibilisatoren auf den Titanoxidelektroden aufgetragenen Rutheniumkomplexe konnte durch die gezielte Variation der Bibyridyl-Liganden erweitert werden (Figur 1). Diese neuen Funktionsmaterialien zeigen stark verbesserte Absorptionseigenschaften.



Figur 1: Von neu entwickelten Rutheniumkomplexen, die dank selektivem Absorptionsverhalten solare Strahlungsenergie effizient umwandeln, werden Elektronenpotentiale direkt zu den über chemische Bindungen gekoppelten Titanoxid-Halbleiterkristalliten transferiert.

Die drei Forschungsgruppen verfügen über international anerkanntes Fachwissen und Erfahrung. Gerade für die Einschätzung des weiteren Ent-

wicklungspotentials sowie des zu erwartenden technischen Stellenwerts der photokatalytischen Wasserstofferzeugung sind diese Kompetenzen ausschlaggebend.

Solarthermische Herstellung von Wasserstoff oder Synthesegas aus fossilen Rohstoffen

Die Reduktion des CO₂-Ausstosses ist eines der wichtigsten Ziele der Energieforschung. Eine kohlenstoff-freie Energiewirtschaft ist deshalb 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-Einssparpotential dar. Im Projekt **Solar Decarbonization of Fossil Fuels – Clean Energy Technology for CO₂ Mitigation** [4] wurde im Experiment und mit Modellrechnungen gezeigt, dass die solarthermische Vergasung von Kohle mit Wasserdampf erfolgreich zur Produktion sogenannter solarer Brennstoffe eingesetzt werden kann. Die Kinetik und die Mechanismen, sowie die verfahrenstechnischen Parameter der dieser Vergasung zu Grunde liegenden Prozesse wurden bestimmt und optimiert. Die Entwicklung eines auf den empirischen Daten basierenden numerischen Modells wurde für diesen vielversprechenden Prozess in Angriff genommen.

Solarthermische Spaltung von Wasserstoff

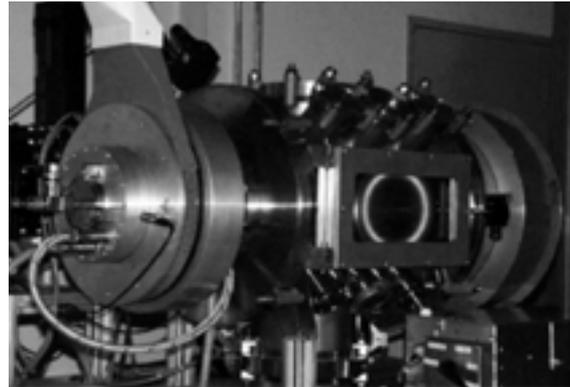
Die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mittels mehrstufiger, reversibler Metall/Metalloxid-Redoxzyklen, gehört zu der über viele Jahre aufgebauten Kernkompetenz des Programms. Um überhaupt möglichst effiziente, technisch realisierbare Prozesse durchführen zu können, bedarf es möglichst konzentrierter Strahlungsenergie, des optimalen Metall/Metalloxid-Systems sowie einer optimalen Prozessführung. An diesen drei Problemstellungen wurden im Berichtsjahr wichtige Resultate erzielt: Im kurz vor dem Abschluss stehenden Projekt: **Solar thermal production of zinc** [5] konnten die chemischen und thermodynamischen Bedingungen für die effiziente solarthermische Produktion von Wasserstoff mit dem Zink / Zinkoxidzyklus bestimmt werden. Die optimalen verfahrenstechnischen Parameter, d.h. die Abtrennung des Zinkdampfs von den restlichen Gasen am Ausgang der Solarreaktoren, wurden im begleitenden Projekt **Auf dem Weg zu solaren Brennstoffen – Physikalisch-**

chemische Beiträge zur Entwicklung von Solarreaktoren [6] erarbeitet. Ausgehend von den bisher erarbeiteten Erfahrungen wurde in Betracht gezogen, nicht nur oxidische, sondern auch sulfidische Mineralien solarthermisch zu reduzieren. Dieser Ansatz ist deshalb bedeutend, weil in der Metallindustrie sehr oft von Sulfidmineralien ausgegangen wird, wobei während der Verhüttung der Rohstoffe grosse Mengen an Schwefeldioxid entstehen. Sollte die am Zinksulfid begonnenen Untersuchungen gezeigt werden können, dass die Herstellung von Zinkmetall mittels konzentrierter Solarstrahlung gelingt und technisch realisierbar ist, so wäre das eine sehr bedeutende Alternative zur konventionellen Herstellung dieses und anderer Metalle. Zur Beantwortung der wichtigen Frage, in welcher Form Zinkoxid bzw. Zinkdampf in der Gasphase vorliegt, wurden im Projekt **Darstellung und Spektroskopie von ZnO bzw. Zn_xO_y in der Gasphase** [7] mittels massenspektrometrischer und ausgewählter spektroskopischer Methoden erste Aussagen über die Art und Grösse der gasförmigen Spezies getroffen werden. Insgesamt lässt sich feststellen, dass dieser seit einigen Jahren intensiv untersuchte solarthermische Prozess die vergleichsweise besten Aussichten hat, technisch realisiert werden zu können. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass andere Forschungsinstitute diesen Prozess ebenfalls aufgegriffen haben und in Abstimmung mit den PSI-Aktivitäten untersuchen.

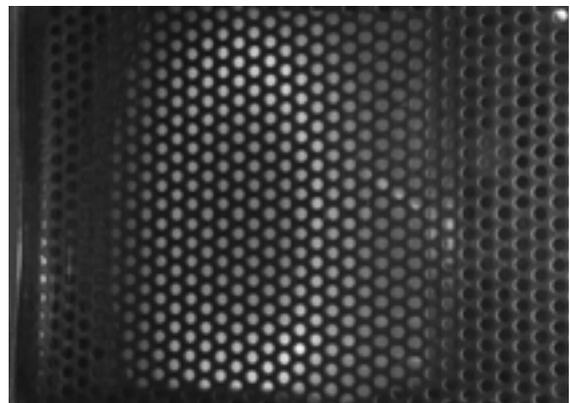
Speicherung von Wasserstoff

Die Speicherung von Wasserstoff ist ein zentrales Thema einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft. Unter den drei gegenwärtig untersuchten Speicherungsverfahren wurden im Programm nur die Optionen Druckspeicherung und Metallhydridspeicherung erforscht. Die Kryospeicherung, also Wasserstoff in flüssiger Form bei extrem tiefen Temperaturen zu speichern, wurde aufgrund wirtschaftlicher und technischer Kriterien nicht bearbeitet. Die Druckspeicherung von Wasserstoff wird seit einigen Jahren in internationalen Programmen zur technischen Reife entwickelt. Neben der Bereitstellung von Kohlefaser-Komposit tanks mit Aluminium- oder HDP-Liner mit einem Fülldruck bis 700 bar werden vor allem auch die Sicherheitsaspekte dieser Wasserstoffspeicher geprüft. Um die Diffusion von Wasserstoff durch die Gefässwände zu minimieren, wurden im Projekt **HYDROBAR** [8] einerseits Plasmaschichtungen von Polymeroberflächen (siehe Figur 2a und 2b) vorgenommen, andererseits eine Apparatur zur Messung der Permeation von Wasserstoff durch unterschiedliche Materialien aufgebaut. Als Schichtmaterialien wurden Me-

talle und Metalloxide abgeschieden. Die nun zur Verfügung stehende Technologie eröffnet eine Vielzahl von Anwendungen, die nicht nur auf die genannte Hochdruck-Speicherung von Wasserstoff beschränkt ist: chemisch reaktive, katalytisch wirkende oder aber inerte nanoskopische Funktionsmaterialien können in unterschiedliche, schichtartig aufgebaute Energiesysteme implementiert werden.



Figur 2a: HV-Plasmakammer an der EIG Genève, in der Metall- oder Metalloxidschichte auf unterschiedlichen Substraten aufgebracht werden können



Figur 2b: DC-Magnetron Entladung: Von einem Target (z.B. Titanoxid) lassen sich unter den gegebenen Bedingungen dünne Schichten aufbauen

Die Optimierung von Metallhydrid-Speicher-materialien wurde experimentell und mittels Modellrechnungen im Projekt **Destabilisation of metal hydride complexes and theoretical modelling** [9] verfolgt. Es wurden Speicherlegierungen möglichst leichter Metalle hinsichtlich grosser Speicherkapazität aber auch hinsichtlich vergleichsweise tiefer Desorptionstemperaturen untersucht. Metallhydride wie Lithiumborhydrid ($LiBH_4$) oder weitere Mischmetallhydride wurden getestet und optimiert. Die Metallhydride der

leichten Elemente desorbieren den Wasserstoff erst bei technisch ungünstig hohen Temperaturen. Die bekannten Hydride der Seltenerd- und Übergangsmetalle lassen sich durch gezielten Einbau von Fremdmetallen thermisch destabilisieren. Die Modellrechnungen erlauben die Identifikation neuer Metallegierungen sowie die Voraussage deren Kristallstrukturen. So konnten vier neue Phasen: LaNi_2Mn_3 , LaMg_2Ni , LaMgNi_4 und NdMgNi_4 mit interessanten Sorptionseigenschaften gefunden werden, d.h. mit Wasserstoff bilden sich die entsprechenden Hydride $\text{LaNi}_2\text{Mn}_3\text{H}_4$, $\text{LaMg}_2\text{NiH}_7$, $\text{LaMgNi}_4\text{H}_4$ und $\text{LaMgNi}_4\text{H}_4$. Die Sorption / Desorption ist reversibel, wobei vor allem die Desorptionstemperatur von 100°C bei 1 bar Umgebungsdruck interessant ist. Auch die Kapazität von 2.8 Gewichtsprozent Wasserstoff ist bemerkenswert. Trotz dieser vielversprechenden Befunde konnten noch keine den industriellen Produkten gleichwertige oder gar überlegene Speichermaterialien identifiziert werden.

Nutzung von Wasserstoff

Da zur Zeit noch keine ausgebaute Infrastruktur für eine flächendeckende Wasserstoffversorgung existiert und deren Errichtung sehr kapitalintensiv ist und somit langsam voranschreitet, werden grosse Anstrengungen auf das Finden von Nischenanwendungen gelegt. Diese Aktivitäten beschränken sich bei uns vorerst auf die Industriebetriebe *Djévahirdijan SA* und *Giovanola SA* (beide in Monthey, VS) sowie *Ammonia Casale* (Lugano, TI) und einige chemische Industrien im Raum Basel. In keinem dieser Unternehmen wird Wasserstoff als Energieträger, sondern – wie weltweit üblich – als wichtige Grundchemikalie eingesetzt. Durch die Aktivitäten von **HYDROPOLE** [10] soll das Netzwerk der Wasserstoffnutzer und damit die Basis für den breiteren Einsatz der Wasserstofftechnologie markant erweitert werden. Ein erster angepeilter Schritt könnte bestehen darin, Wasserstoff-Erdgas-Gemische als Energieträger für Automobile anzubieten. Diese von der Gasindustrie verfolgte Strategie könnte einem schrittweisen Übergang von kohlenstoffhaltigen, flüssigen (Benzin, Diesel, Kerosin) zu gasförmigen Energieträgern (Erdgas) und schliesslich zu reinem Wasserstoff den Weg bereiten. Dabei könnten die notwendigen infrastrukturellen Anpassungen bzw. Neuinstallationen in einem wirtschaftlich tragbaren Mass erfolgen.

KOMPLEMENTÄRE ENERGIETECHNOLOGIEN UND PROZESSE

Neben der direkten Umwandlung von konzentrierter solarer Strahlung mit Hilfe der beschriebenen

Metalloxidzyklen kommt der Umwandlung in Prozessenergie unterschiedlicher Temperatur grosse Bedeutung zu. Im Projekt **Materialien für nachhaltige Technologien in der Energieumwandlung und Energieeinsparung** [11] wurde im Berichtsjahr die Abscheidung von Schichtsystemen für die Anwendung als farbige Abdeckgläser von Sonnenkollektoren fortgesetzt. Die Infrastruktur für die Schichtabscheidung wurde durch ein neues Magnetron mit zwei konzentrischen Targets ergänzt. Diese Quelle erlaubt die simultane Abscheidung von zwei Materialien, wobei das Konzentrationsverhältnis über die elektrische Ansteuerung eingestellt werden kann. Erste Tests haben gezeigt, dass gegenüber den bisher verwendeten Magnetrons, dank einer verbesserten Kühlung, die doppelte Sputterrate erreicht werden kann. Eine neu gebaute optische Apparatur erlaubt eine detaillierte spektrale und winkelabhängige Charakterisierung von Komponenten von Gebäudefenstern (Gläser, Beschichtungen, Folien, u.s.w.) und von ganzen Fenstern. Diese Apparatur konnte erfolgreich getestet werden. Die Zielsetzung dieses Projekts ist die genaue Bestimmung der optischen Eigenschaften der heute eingesetzten Fenster, um das Potential der Energieeinsparung durch optimierte Transmissions- und Reflexionseigenschaften abzuklären. Zudem sollen die Daten für die dynamische thermische Modellierung von Gebäuden eingesetzt werden. Der sommerliche Wärmeschutz ist dabei von besonderem Interesse.

Ein immer noch unterschätztes Potential für die Reduktion von Kohlendioxid ist dessen Verwendung als Rohstoff für die Synthese von wertschöpfenden Kohlenstoffverbindungen oder als Lösungsmittel bzw. Reaktionsmedium. Im seit etlichen Jahren erfolgreich bearbeiteten Projekt **Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen Kohlendioxid-Quellen** [12] zeigte eine innovative Erweiterung vielversprechende Resultate: Kohlendioxid wird im überkritischen Zustand als Reaktionspartner und Reaktionsmedium eingesetzt. Unter diesen Bedingungen lassen sich katalytische Synthesen z.B. zu Aminen und anderen organischen Verbindungen wie Carbamaten, Formamiden oder zyklischen Carbonaten durchführen. Diese Produkte sind industriell wichtige Grund- und Feinchemikalien. Die bisherigen, international stark beachteten Arbeiten zeigen auf, dass diese unkonventionellen Synthesewege nicht nur energetisch, und ökonomisch, sondern auch ökologisch effiziente Alternativen zu gängigen Synthesen darstellen.

Nationale Zusammenarbeit

Durch die Schwerpunktbildung, vor allem durch die Konzentration der Aktivitäten auf die 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. Da nun die Institution **HYDROPOLE** als vorerst virtuelles Wasserstoffkompetenzzentrum der Schweiz aktiv wurde, konnten zumindest die Kenntnisse über den Stand der Forschung, Entwicklung und der industriellen Bedeutung von Wasserstoff bzw. der Wasserstofftechnologie erfasst 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 Hochdruck-Elektrolyse und die solarthermische Spaltung von

Wasser - werden kompetent betrieben, so dass deren Zukunfts- und spezifisches Einsatzpotential durch den Austausch der unterschiedlichen Erfahrungen verlässlich abgeklärt werden können. Mit *Hydropole* und auch mit den P+D Projekten wurden neue Partnerschaften zwischen Industriebetrieben und Hochschulinstituten initiiert.

Die Koordination des Programms *Wasserstoff / Solarchemie* mit den Programmen *Brennstoffzellen* und *Verbrennung* wurde verstärkt. Einerseits waren dafür der Wasserstoff als ein für die genannten Programme wichtiger Energieträger und andererseits das Themenfeld *Funktionsmaterialien für regenerative Energiesysteme* ausschlaggebende Faktoren. Durch den intensiver gewordenen Austausch mit der Industrie konnte das letztgenannte, für den Technologiestandort Schweiz bedeutende Thema verstärkt werden.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit wurde auf ganz unterschiedlichen Ebenen gepflegt und weiter verstärkt. Neben klar fachspezifischen Kooperationen zwischen in- und ausländischen Projektnehmern - so z.B. zwischen dem STL am PSI und der Australian National University, Canberra, Australien, oder mit der italienischen Firma *Quali-Cal* - halfen vor allem zwei internationale Anlässe, die Themen Solarchemie und Wasserstoff in übergreifenden Zusammenhängen darzustellen und zu diskutieren:

Das **11th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies** vom September 2002 in Zürich muss an erster Stelle genannt werden. Die von der ETH, dem BFE und dem PSI organisierte und durchgeführte Konferenz verlief sehr erfolgreich. Die Teilnehmerzahl war noch nie so hoch, und die Qualität der Beiträge auf durchwegs hohem Niveau. An diesem Anlass konnten sehr gute Kontakte aufgebaut werden, die sich für die weitere Entwicklung der schweizerischen solarchemischen Forschungsarbeiten sicher positiv auswirken werden.

An der **14th World Hydrogen Conference** (WHEC 2002) vom Juni 2002 in Montréal, Canada, wurden die schweizerischen F+E Aktivitäten auf dem Gebiet der Wasserstofftechnologie vorgestellt. Darüber hinaus wurde eine Bewerbung für die Ausrichtung der WHEC 2006

eingereicht. Der Zuschlag ging jedoch an die französische Wasserstoffgesellschaft *AFH₂ (Association Française de l'Hydrogène)*. Diese Gesellschaft wird auch die **1st European Hydrogen Energy Conference (EHEC 2003)** in Grenoble durchführen. In Paris fanden koordinierende Gespräche zwischen dem Vorstand von *HYDROPOLE* und dem Vorstand von *AFH₂* statt. Dabei wurde eine enge Zusammenarbeit für die Ausrichtung beider Konferenzen vereinbart.

Ein Grossteil der Programmaktivitäten ist in internationale Forschungsprogramme integriert. Folgende Programme wurden mit Mitteln des Programms *Solarchemie / Wasserstoff* gefördert:

- ◆ Leitung des IEA-Programms **Solar PACES (Solar Power and Chemical Energy Systems)** [13]
- ◆ Leitung des IEA-Projekts **Photoproduction of Hydrogen and Case Studies of Integrated Systems** [14]

Wissenschaftliche Zusammenarbeiten erfolgten mit einer grösseren Anzahl von Partnerinstitutionen. Als wichtigste sind zu nennen:

- ◆ Australian National University, Canberra
- ◆ Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln
- ◆ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg, Deutschland

- ◆ Solarforschungszentrum Odeillo, Frankreich
- ◆ Solar Energy Research Center, The Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel
- ◆ Boreskov Institute of Catalysis, Novosibirsk, Russland
- ◆ Plataforma Solar de Almería, Tabernas, Spanien
- ◆ AG Solar, Nordrhein-Westfalen, Deutschland
- ◆ TÜV Saarland, Deutschland

Eine weitere Hauptaktivität auf internationaler Ebene galt dem Aufbau eines Netzwerks von

materialwissenschaftlichen Kompetenzen. Wie erwähnt werden Funktionsmaterialien immer wichtiger und sind teilweise entscheidend für neue Entwicklungen, wie für Elektroden- und Membranmaterialien für Brennstoffzellen. Diesem Sachverhalt wurde insofern Rechnung getragen, als die Zusammenarbeiten mit dem Anwenderzentrum für Material- und Umweltwissenschaften, dem Wissenschaftszentrum Umwelt und dem Lehrstuhl für Festkörperchemie der Universität Augsburg, mit dem TÜV Saarland und mit dem European Joint Research Centre in Petten (NL) intensiviert wurden.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Reinen Wasserstoff über solar betriebene Prozesse zu gewinnen, wird im **Solar Ammonia Project** [15] auch an der Australian National University angestrebt. Im Berichtsjahr wurde die katalytische Ammoniak-Dissoziation zur Herstellung von reinem Wasserstoff für PEM-Brennstoffzellen im Kleinmassstab zu untersuchen. Mit Hilfe einer LifeCycleAnalysis (LCA) soll versucht werden, die Leistungsfähigkeit dieser Lösung in Hinblick auf technische Machbarkeit und Ökoeffizienz zu charakterisieren.

Im Projekt **Redox-Kreisprozess zur Produktion von reinem Wasserstoff aus dem Rohgas eines Holzvergasers** [16] wird versucht, möglichst effizient Synthesegas zu erzeugen, welches entweder direkt für die Stromproduktion genutzt oder in chemischen Prozessen zu Treibstoffen umgesetzt werden kann. Um den Prozess möglichst effizient zu gestalten und gleichzeitig der Bildung von unerwünschten Nebenprodukten wie Teeren oder Methan entgegenzuwirken, werden katalytische redoxaktive Materialien auf der Basis von Eisennickeloxid oder von Olivin (Eisen-Magnesiumsilikat) erprobt. Die experimentellen Arbeiten an Eisenmischoxiden wurden im Berichtsjahr abgeschlossen. Fazit: der Einsatz von Eisennickeloxiden mit Spinellstruktur bietet einen interessanten Ansatz für die Umsetzung von teer- und schwefel-belasteten Gasen zu reinem Wasserstoff. Olivin ist für den Sauerstofftransfer sehr gut geeignet, d.h. durch die Wirkung dieses reaktiven Bettmaterials konnte der Teer- und Methangehalt beim Vergasen signifikant gesenkt und damit die Aufwendungen für die Gasaufbereitung vermindert werden.

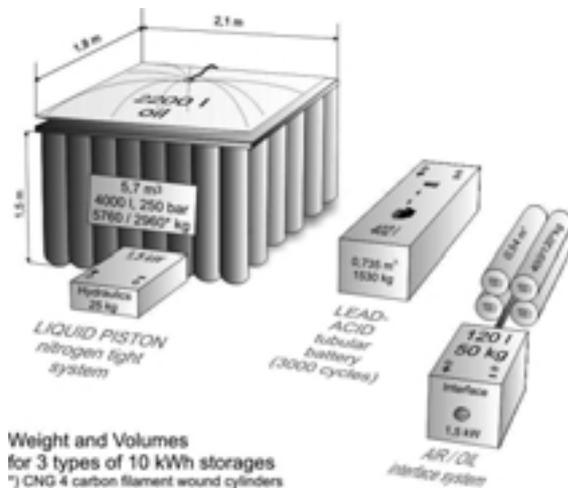
Die im Projekt **Solare Herstellung von Kalk** [17] erzielten Resultate sind vielversprechend und zeigen realisierbare technische Lösungen auf. In

Anbetracht der Kohlendioxid-Problematik wäre die solare Herstellung von Kalk oder Keramiken sehr effizient bei der Einsparung von fossilen Brennstoffen. Der Entscheid, ob grosse oder kleine Anlagen günstiger sind, ist vom jeweiligen Standort abhängig. Wirtschaftlich betrachtet sind kleine, dezentral gelegene Anlagen attraktiver. Insgesamt sind aber die Fixkosten dieser Technologie noch zu hoch.

Die Arbeiten am Projekt **Solarthermische Methoden in der Kreislaufwirtschaft** [18] wurden abgeschlossen. Eine Anzahl von technischen Prozessen, die in solarthermischen Reaktoren effizient und CO₂-sparend eingesetzt werden können, wie thermische Zersetzungen von organischen Abfällen und Reststoffen, Schmelzen von Schrotten, Vitrifizierung von toxischen Metallen und Metallverbindungen, etc. wurden identifiziert. Die Wirtschaftlichkeit ist wegen der hohen Fixkosten noch nicht gegeben. Die Besteuerung von Kohlendioxid oder die in Kürze greifenden Emission-Trading-Systeme dürften diese Situation massiv verändern, so dass eine nochmalige Prüfung der Wirtschaftlichkeit angedacht werden muss.

Die Speicherung von Energie in Druckluft wird zwar in der Industrie in hohem Masse genutzt, aber das Potential scheint noch lange nicht ausgeschöpft zu sein. Im Projekt **Druckluft - Ein Energiespeicher der Zukunft** [19] wurde eine Vergleichsstudie erstellt, die klar belegt, dass ein effizienter Druckluftspeicher gegenüber chemischen Speichersystemen wie z.B. Bleibatterien grosse Vorteile aufweist: hohe Wirkungsgrade und eine enorme Anpassungsfähigkeit an unterschiedlichste Speise- und Lastkollektive. Der sekundäre Energieträger Druckluft eröffnet deshalb neue Möglichkeiten für Energieketten mit einer

sehr schnellen und praktisch beliebig oft wiederholbaren Aufladung, einer beliebigen Aufteilung der gespeicherten Energie, einer genauen Erfas-



Figur 3: Vergleich von Volumen und Gewicht zwischen den 10 kWh Energiespeichern Bleiakкумуляtor und den Druckluftsystemen auf sogenannter Liquid-Piston-Basis bzw. auf Interface-Basis (siehe auch [21]).

sung des Ladezustands und eines vernachlässigbaren chemischen Risikos. Der Vergleich zwischen unterschiedlichen Speichermethoden zeigt, dass Druckluftsysteme sehr attraktiv sind (Figur 3).

In einem gemeinsamen Projekt der Firma BSR, Lörrach, und der Abteilung Festkörperchemie der Universität Augsburg wurden **Optimierte Flüssigkeitslichtleiter zum Transport von hochkonzentriertem Sonnenlicht** [20] charakterisiert und optimiert. Diese Technologie erlaubt es, mittels Parabolspiegel fokussiertes Sonnenlicht über Distanzen von bis zu 50 Metern zu transportieren. Die Transmission bzw. die Effizienz der Lichtleitung wird dabei direkt vom flüssigen Medium und von den Materialeigenschaften des Kunststoffschlauchs beeinflusst. In einer breit angelegten Versuchsreihe wurden diese Einflussgrößen derart optimiert, dass wenige Prototypen unter Praxisbedingungen erprobt werden konnten.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Im Berichtsjahr konnten für das Programm *Solarchemie / Wasserstoff* die gesteckten Ziele grösstenteils erreicht werden. Die meisten Projekte zeigten, dass der Verfügbarkeit optimierter Funktionsmaterialien bzw. **verfahrenstechnischen Wissens** ein immer bedeutenderer Stellenwert zugebilligt werden muss. Diese Feststellung verdeutlicht, dass moderne und zukünftige Energiesysteme auf der Verfügbarkeit und Kontrollierbarkeit von entsprechenden Materialsystemen beruhen. Dies gilt insbesondere für die Nutzung gasförmiger Energieträger, in extremem Mass für die Wasserstofftechnologie. In dieser Situation kann der Technologiestandort Schweiz über die Energieforschung wichtige Beiträge leisten, denn durch die langjährige Beschäftigung mit Materialbearbeitung (z.B. in der Maschinenindustrie), mit effizienter Prozessführung (z.B. Zementindustrie, chemische Industrie) und durch ein immer noch hochstehendes Ausbildungs- und Forschungsnetzwerk lassen sich hierzulande Energietransformatoren physikalisch-chemischer Art entwickeln, mit denen ausgehend von regenerativen, ökologisch verantwortbaren Energiequellen neue sekundäre Energieträger bereitgestellt werden können.

Herauszuheben sind die Fortschritte, die bei der **Entwicklung von selektiven Absorber- und Elektrodenmaterialien** erzielt wurden. Für die Weiterentwicklung der photoelektrokatalytisch arbeitenden Tandemzelle wird sich die Frage nach einem festen Elektrolyten und nach neuen, preiswerten und reversibel arbeitenden Metalllegierungen bzw. Metallhydrid-Wasserstoffspeichermaterialien aufdrängen. Kurzfristig können keine Patentlösungen erwartet werden, aber es existiert eine wissenschaftliche, technische und industrielle Infrastruktur, die erfolgreich an der tiefgreifenden Veränderung unseres Energiesystems arbeitet. Die Vernetzung mit anderen Energieforschungsprogrammen sollte zu verhindern vermögen, dass man sich allzu früh auf eine Strategie, eine Energieform festlegt, welche die hohen Anforderungen ungenügend abdeckt. Im Rahmen der öffentlichen Verleihung des Hans Moppert-Preises unter der Ägide der Bank Sarasin (Basel) wurde unter anderen das vom BFE geförderte Projekt **Druckluft als Energiespeicher** [21] ausgezeichnet.

Die **Zielsetzungen für das Jahr 2003** sind klar. Für die Herstellung von Wasserstoff sollen die

Techniken bezüglich Effizienz und Einsatzpotential optimiert werden. Während die Hochdruckelektrolyse schon in industriellem Massstab eingesetzt wird, aber noch weitere Einsatzmöglichkeiten gefunden werden sollen, gilt es für die solaren Methoden, Entwicklungsschritte mit dem Ziel der Realisierung von Prototypanlagen zu vollziehen. Die Aktivitäten der BFE-Projekte zur Entwicklung, Prüfung und Homologisierung von Speichersystemen für gasförmige Energieträger - neben Wasserstoff auch Erdgas - sollen national (Erdgasvereinigung, EMPA) und international (TÜV Deutschland) koordiniert werden. Eine Charakterisierung der in den Projekten der Programme *Solarchemie / Wasserstoff, Brennstoffzellen* und *Verbrennung* notwendigen bzw. eingesetzten Funktionsmaterialien ist unerlässlich. Dazu wird ein Servicesystem aufgebaut, das entsprechende Messungen durchführt oder an kompetente Stellen weitervermittelt. Dem Trend hin zu mikro- und nanoskopischen Materialsystemen einerseits und zu gasförmigen (sekundären) Energieträgern andererseits, soll mit der Bereitstellung entsprechender Fertigungs-, Untersuchungs- und Prüfmethode Rechnung getragen werden. Eine wichtige Funktion muss in diesem Zusammenhang *HYDROPOLE* beim Zusam-

mengetragen, Verwalten und Kommunizieren des notwendigen Fachwissens erfüllen.

Die Nutzungsmöglichkeiten von solarer Prozesswärme müssen in Zusammenarbeit mit anderen BFE-Programmen klar definiert und praxistauglich gemacht werden. Auch für die Entwicklungen der Biomasseverwertung, des solaren Kalkbrennens und der Immobilisierung von Reststoffen sollen zusammen mit Industrieunternehmen Umsetzungen in die Praxis angestrebt werden. Es ist bekannt, dass die aktuelle Wirtschaftslage nicht günstig ist; trotzdem können die Forschungsarbeiten nur dann weiterverfolgt werden, wenn deren Resultate in absehbarer Zeit technische und ökonomische Relevanz erlangen.

Die im Berichtsjahr intensiv erfolgte **Öffentlichkeitsarbeit** soll im Jahr 2003 nochmals verstärkt werden. Es ist geplant, mit gezielten *HYDROPOLE*-Aktivitäten ein breites Interesse für regenerative Energiesysteme zu wecken. Des Weiteren sollen die Arbeiten des Programms mit Vorträgen für die Öffentlichkeit und für das Fachpublikum sowie mit Publikationen in unterschiedlichsten Organen bekannt gemacht werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 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: **Solar thermal production of zinc** (JB)
- [6] M. Sturzenegger, (m.sturzenegger@psi.ch) I. Alxneit, M. Musella, H. R. Tschudi, PSI Villigen: **Auf dem Weg zu solaren Brennstoffen – Physikalisch-chemische Beiträge zur Entwicklung von Solarreaktoren** (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] E.M. Moser, (e.m.moser@eig.ch) Incoat GmbH, Löhningen und Ecole des Ingenieurs, Genève: **Hydrobar – Diffusionsspererschichten für Wasserstoff** (JB)

- [9] K. Yvon, (klaus.yvon@cryst.unige.ch) UNI Genève: **Destabilisation of metal hydride complexes and theoretical modelling** (JB)
- [10] **Hydropole**, (www.hydropole.ch) Schweizerisches Wasserstoff-Kompetenzzentrum, c/o IWA, Winterthur (JB)
- [11] 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** (JB)
- [12] A. Baiker, (baiker@tech.chem.ethz.ch) ETH-Zürich: **Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen Kohlendioxid-Quellen** (JB)

Liste der P+D-Projekte

- [13] A. Steinfeld, (aldo.steinfeld@psi.ch) ETH Zürich: **Leitung des IEA-Programms SolarPACES** (Solar Power and Chemical Energy Systems) (JB).
- [14] 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).
- [15] O. Becker and A. Luzzi (girasola@cyberone.com.au) Australian National University, Canberra, Australien: **Solar Ammonia Project** (JB).
- [16] S. Biollaz, (serge.biollaz@psi.ch) M. Sturzenegger und S. Stucki, PSI Villigen: **Redox-Kreisprozess zur Produktion von reinem Wasserstoff aus dem Rohgas eines Holzvergasers (Redox-Filter)** (JB)
- [17] A. Meier, (annton.meier@psi.ch) PSI Villigen, und E. Bonaldi, QUALICAL, Bergamo, (I): **Solare Herstellung von Kalk** (SB)
- [18] B. Schaffner, PSI Villigen, W. Hoffelner, RWH Consult GmbH, Oberrohrdorf und A. Steinfeld, (aldo.steinfeld@psi.ch) ETH Zürich: **Solarthermische Prozesse in der Kreislaufwirtschaft** (SB)
- [19] I. Cyphelly, (cmr@ran.es) Les Brenets: **Druckluft - Ein Energiespeicher mit Zukunft** (JB)
- [20] A. Tupin und J. Kleinwächter, BSR, Lörrach (D): **Optimierte Flüssigkeitslichtleiter zum Transport von hochkonzentriertem Sonnenlicht** (SB)

Referenzen

- [21] A. Reller und I. Cyphelly: **Speicherung gasförmiger Energieträger - Eine Bestandsaufnahme**, VDI-Berichte 1734 (2002) 37 – 45.

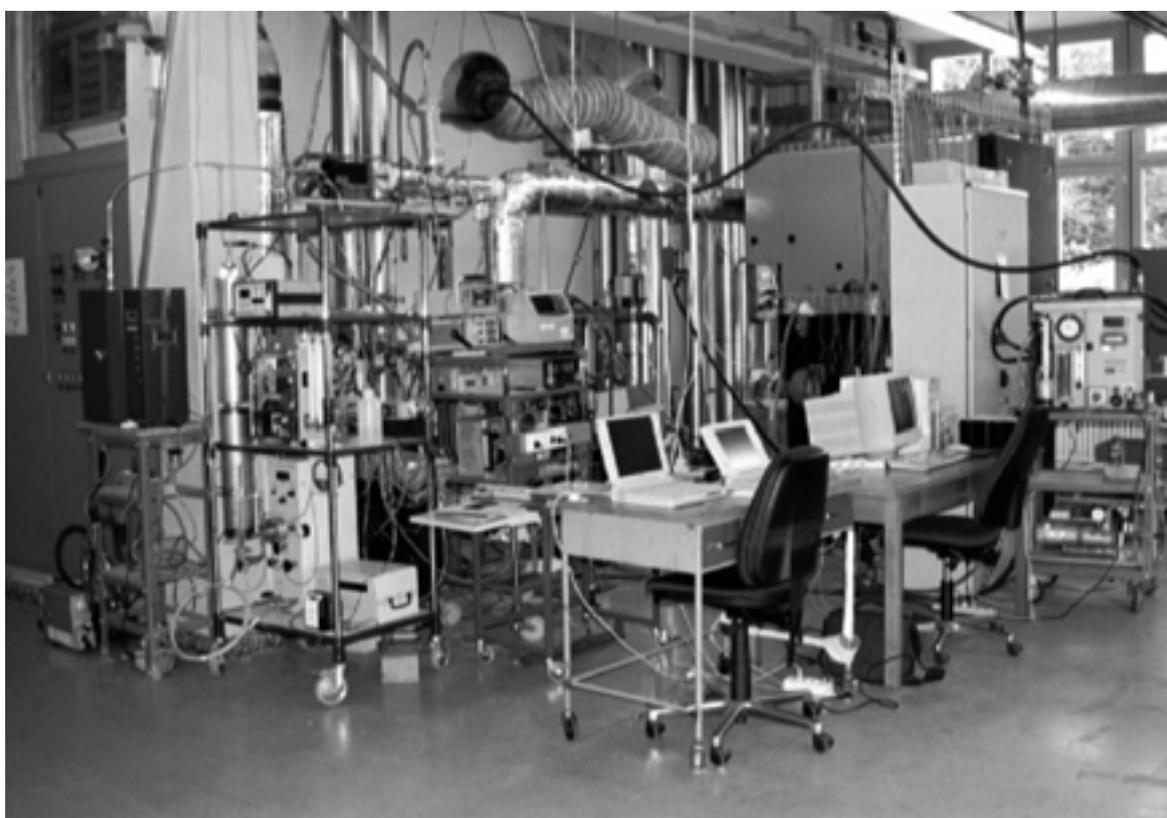
BIOMASSE

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2002

Daniel Binggeli; Bruno Guggisberg

daniel.binggeli@bfe.admin.ch

bruno.guggisberg@bfe.admin.ch



Partikel aus Holzfeuerungen

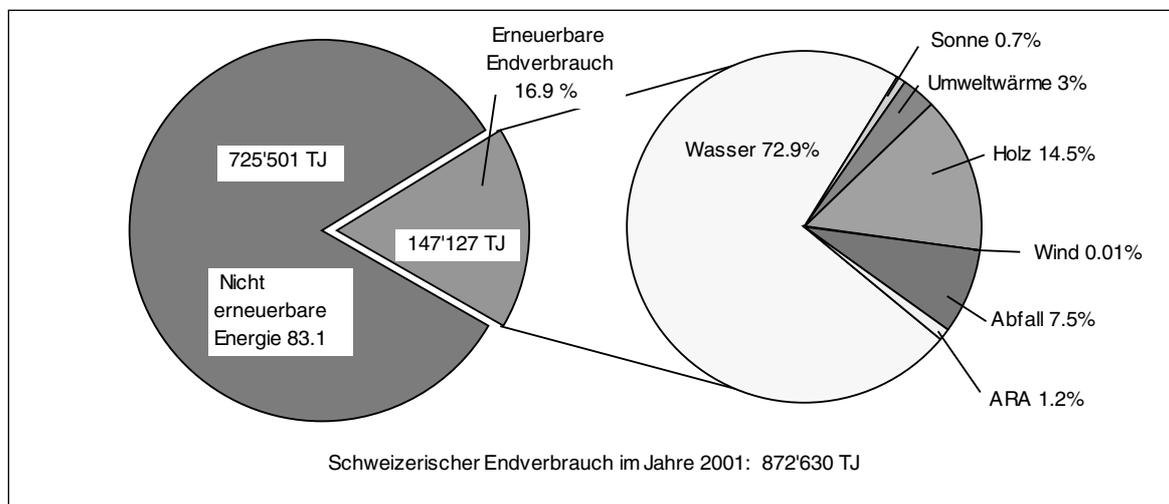
Auf einer Unterschubfeuerung mit 80 kW Nennleistung wurde versucht die Partikelbildung zu beeinflussen. Zu Sehen sind Partikelmessstrecke, Partikelanalytik und Gasanalyse und Messdatenerfassung.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

EINLEITUNG

Das Forschungsprogramm *Biomasse* konzentriert sich auf die effiziente Umwandlung von Biomasse in Wärme, Strom und Treibstoff. Es soll mithelfen, dass der Beitrag der Biomasse zur schweizerischen Energieversorgung stetig erhöht wird. Der Energieträger Biomasse soll möglichst ökologisch und ökonomisch, mit einer maximalen Substitutionswirkung auf fossile Energieträger eingesetzt werden. Die Energieproduktion aus 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



Figur 1: Aufteilung des gesamtschweizerischen Endenergieverbrauchs 2001 auf erneuerbare und nicht erneuerbare Energiequellen

erbrachte 2001 rund 3.9% des schweizerischen Gesamtendenergieverbrauchs (thermisch und elektrisch) resp. 23.3% des erneuerbaren Endverbrauchs. Das mittelfristige politische Ziel des Bundes ist jedoch eine Verdoppelung der Nutzung von Biomasse.

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 ungenutzten Biomasse aus Wäldern und Brachflächen
- b) Optimieren der biogenen Stoffflüsse (u.a. Abfälle) unter Berücksichtigung der gesetzlichen Randbedingungen

PROGRAMMSCHWERPUNKTE

Die drei Schwerpunkte: (a) vermehrte Nutzung von Biomasse, (b) Optimieren der biogenen Stoffflüsse und (c) Verbesserung der Gesamtwirkungsgrade wurden für Forschung und deren Umsetzung festgelegt unter Berücksichtigung der folgenden Faktoren und Randbedingungen: Die Systemgrenze Schweiz, die gesetzlichen Randbedingungen wie LRV, etc., und das Konzept der Energieforschung des Bundes 2004-2007 [33].

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.**

Die Energie aus Biomasse wird im Endverbrauch zum grössten Teil **thermisch** (ca. 92%), **elektrisch** (ca. 7%) und zu einem geringen Anteil als **Treibstoff** (<1%) genutzt.

ANVISIERTE ZIELE

Generelles und langfristiges Ziel ist, 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:

- Grundlagenarbeiten über die Entstehung von Partikeln weiterführen und abschliessen
- Entwicklung von Holzfeuerungsanlagen für Niedrigenergiehäuser vorantreiben
- die Holz-Vergasungstechnologien forcieren
- Förderung von Biogas als Treibstoff (direkter CO₂-Ersatz)
- Know-how für Planung, Bau, Betrieb und Anwendung von industriellen, kommunalen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen ausbauen
- das Auswerten von bestehenden P+D-Anlagen im Bereich landwirtschaftlicher Co-Vergärung sowie das Unterstützen von Neuinstallationen
- allgemein 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

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

BIOMASSE UMWANDELN

a) Biomasse verbrennen und vergasen

Im Projekt **Herstellung und Eigenschaften von Holzpellets als Brennstoff** [1a] wurden die Einflüsse von Presshilfsmitteln auf die Herstellung, Qualität, Lagerung und Verbrennung von Holzpellets untersucht und der Fremdennergieverbrauch für die Trocknung und Pelletierung ermittelt. Im Weiteren erfolgten Verbrennungsversuche, Versuche zum Lagerungsverhalten und eine Abschätzung der Ökobilanz. Die Arbeiten wurden im Schlussbericht veröffentlicht. Im weiteren wurde eine Übersicht der wichtigsten Techniken und Anwendungen von Pelletfeuerungen bei Schweizerischer Baudokumentation veröffentlicht, der als Separat-Druck von Holzenergie Schweiz an Interessente abgegeben wird.

Am 18. Oktober 2002 fand das **7. Holzenergie Symposium** [1f] statt. Ein Forum für den Erfahrungsaustausch zum aktuellen Stand der Technik: Beeinflussung der Feinstaubemissionen in Feuerungen, Verfahren des Staubabscheidens, Systemoptimierung automatischer Holzfeuerungen und Stromerzeugung. Im weiteren wurden die Holzenergie-Förderung, das Altholzkonzept

des Bundes und die TA-Luft für Holzfeuerungen thematisiert.

Potenzial des Gegenstromvergaser als schadstoffarme Holzfeuerung [1e]. Gegenstromvergaser sind eine mögliche Alternative zu automatischen Holzfeuerungen. Auf Grund des Prozessablaufs wird eine Verminderung der Stickoxide und der Partikel im Vergleich zu einer konventionellen Verbrennung erwartet. Ziel des Projekts ist deshalb, das Potenzial des Gegenstromvergaser zur Wärmeerzeugung aus Holz abzuklären und dabei insbesondere die Emissionen mit einer direkten Verbrennung zu vergleichen. Im Berichtsjahr wurden die Dimensionierungsgrundlagen erarbeitet, die Konstruktion und das Regelkonzept festgelegt sowie und die Messtechnik vorbereitet. Der Bau der Versuchsanlage ist für das nächste Jahr geplant.

Ziel der Untersuchung **Grundlagen der Aerosolbildung** [1c] ist eine Beeinflussung der Partikelemissionen von automatischen Holzfeuerungen durch Betriebsparameter und feuerungstechnische Massnahmen sowie eine Beschreibung der Bildungsmechanismen. Dazu wurde eine Versuchsanlage aufgebaut, die verschiedene Variationsmöglichkeiten aufweistbildet. Es kann-

te gezeigt werden, dass die Staubemissionen durch den Glutbett-Luftüberschuss signifikant beeinflusst werden, was durch die verstärkte Umsetzung von Mineralstoffen wie Kalium zu leichtflüchtigen Oxiden bei Anwesenheit von Sauerstoff erklärt wird. Der Schlussbericht wird im Frühjahr erwartet.

Die **Systemoptimierung automatischer Holzfeuerungen** [1d] hat zum Ziel, dass bestehende automatische Holzfeuerungen optimal eingesetzt und betrieben werden. In Phase 1 sind fünf Anlagen untersucht worden. Bei jeder Anlage wurde eine Situationsanalyse durchgeführt und ein Massnahmenplan für den Betreiber erstellt. Durch Umsetzung der Massnahmen, die derzeit im Gang ist, kann die Wirtschaftlichkeit teilweise erheblich verbessert werden. Im Weiteren werden die Wirkungsgrade der Wärmeerzeugung und -verteilung erhöht und die Emissionen verringert. In Phase 2 wird die Systemoptimierung derzeit an 25 weiteren Anlagen durchgeführt.

Im Messprojekt **Erfolgskontrolle für Ortsgesetzte Speicheröfen** [3a] wurden 20 Anlagen ausgemessen. Die vom Hafner erbauten Speicheröfen werden mit dem Schweizer Qualitätssiegel für Holz-Feuerstätten im Wohnbereich ausgezeichnet, wenn nachgewiesen werden kann, dass die Auslegung des Speicherofens gemäss dem Ofenberechnungs-Programm OBP erfolgte. An ausgewählten zertifizierten Speicheröfen wurden der CO-Gehalt und der Wirkungsgrad gemessen und mit den vorgegebenen Anforderungen verglichen. Der vorgegebene Wirkungsgrad wurde bei 12 von 20 Anlagen erreicht. Die CO-Werte wurden bei 13 von Anlagen eingehalten.

Auslegung und Optimierung von Holzspeicheröfen [3b]: Der Schweizerische Verband der Hafner- und Plattengeschäfte, VHP will ein neues Planungswerkzeug schaffen, das dem Ofenbauer erlaubt, die energietechnische Einbindung der Feuerung in ein Haus richtig zu dimensionieren. Die Wärmeabgabe im Aufstellungsraum und im ganzen Haus muss dabei den Behaglichkeitsanforderungen genügen. Es werden die 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.

Bei den Schweizerischen Herstellern und Importeuren für Holzfeuerungen besteht der Bedarf

für eine heimische **akkreditierte Prüfstelle für Holzfeuerungen** [4]. Die Fachhochschule beider Basel (FHBB) und das Ökozentrum Langenbruck (ÖZL) haben eine Zusammenarbeit für die Einrichtung der Prüfstelle an der FHBB beschlossen. Mit der Realisierung des Projekts wurde im Juni 2002 begonnen. Die Arbeiten verlaufen nach Plan und die Akkreditierung wird für August 2003 erwartet.

Das Projekt **Entwicklung neuartiger Holz-Hybridheizsysteme** [5] wurde abgeschlossen. Die Absorbertechnik ist eine interessante Technologie für Niedrigenergiehäuser (*MINERGIE* oder *Passiv-Haus*). Die Wärme kann bedarfsgesteuert an einen Wasserkreislauf abgeben und im Gebäude verteilt werden. Die Entwicklung wird von der Privatindustrie weiter vorangetrieben.

Die Ziele der Vertretungen in der **International Energy Agency (IEA), Bioenergy Task 32 Biomass Combustion and Cofiring** [1b] und **IEA Task 33, Thermal Gasification of Biomass** [2] 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 Gesetzgebung zu kennen sowie die schweizerischen Anstrengungen bekannt zu machen.

b) Biogene Abfälle vergären

Valorisation énergétique (biogaz) d'huiles comestibles usagées par codigestion avec différents déchets d'origine agroalimentaire [6]: In diesem Projekt wurde die energetische Verwertung von Ölabbfällen aus dem Lebensmittelbereich mittels einer Pilotanlage (Co-Vergärungsprozess) auf die technische und wirtschaftliche Machbarkeit hin untersucht. Es hat sich gezeigt, dass die Co-Vergärung von Altspeiseölen und Abfällen aus der Lebensmittelindustrie möglich ist und interessante Erträge erzielen kann. Allerdings ist der Anteil Öl auf rund 15% der Trockensubstanz des Gemischs begrenzt.

Vertretung der Schweiz im **IEA Bioenergy Agreement, Bioenergy Task 37, Energy from Biogas and Landfill Gas** [7]. Ziel ist der Informationsaustausch, die Anregung neuer Projekte und die Erhöhung des Bekanntheitsgrads der anaeroben Vergärung von organischen Abfällen sowie der Biogasaufbereitung und -nutzung von Abfalldeponien.

Vertretung der Schweiz im **EU Centre Information Biogaz** [6b]: Die ursprüngliche Aufgaben-

stellung bestand darin, den Kontakt zwischen der Schweiz und dem seit Frühjahr 2001 im Aufbau befindenden europäischen Biogasdokumentations- und Informationszentrums zu gewährleisten. Diese verlagerte sich jedoch allmählich auf gemeinsame Informationsveranstaltungen mit französischen und anderen europäischen Institutionen über die Erfahrungen, Möglichkeiten und das Know-how auf dem Gebiet der Vergärung von Abfällen in der Schweiz.

Kennwertmodell für die Stromproduktion aus landwirtschaftlichem Biogas [8]: Für die Produktion von Strom aus in landwirtschaftlichen Anlagen produziertem Biogas wurde in einem früheren Projekt eine detaillierte Ökobilanz ausgearbeitet. Diese Ökobilanz ist eine Voraussetzung zur Auszeichnung dieser Art der Strombereitstellung mit dem Qualitätslabel *naturemade star*. Basierend auf diesen Arbeiten hat der Verein für umweltgerechte Elektrizität (VUE) die Auszeichnung grundsätzlich befürwortet. Um einzelne Anlagen mit dem globalen Kriterium zu prüfen, müssen die Ergebnisse der Ökobilanz in einem sogenannten Kennwertmodell umgesetzt werden. Im Rahmen dieses Projekts wurde in EXCEL ein solches Kennwertmodell für Strom aus landwirtschaftlichem Biogas erarbeitet. Somit sind nun alle Voraussetzungen erfüllt, damit sich einzelne Anlagen zur Prüfung anmelden können.

Ökobilanz von Strom aus Klärgas [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.

Vorstudie Grüngutvergärung Zermatt [10]: Die Kehrrechtverbrennungsanlage (KVA) Zermatt wurde Mitte 2002 stillgelegt. Mit dieser Vorstudie wollte man die Machbarkeit der Nutzung der stillgelegten KVA als Standort für die neue Vergärungsanlage prüfen. Die Studie zeigt, dass in Zermatt die geplante Grüngutverwertung mit einer Vergärungsanlage hätte realisiert werden können. Leider kommt das Projekt nicht zur Realisierung, weil die Gemeinde das neue Abfall- und Gebührenreglement, das eine Getrennsammlung vorgesehen hätte, abgelehnt hat.

Finanzierung von Biogasanlagen in der Landwirtschaft [11]: Der vorliegende Leitfaden zeigt den interessierten Landwirten mögliche Fi-

nanzierungslösungen und Finanzierungsquellen. Er kann von der Homepage der *Informationsstelle Biomasse* heruntergeladen werden.

Messkampagne für eine solare Klärschlamm-trocknungsanlage in Bilten GL [12]: Die Entwässerung von Klärschlamm hilft die Kosten für dessen Entsorgung zu senken. Die resultierenden Trockensubstanz-Gehalte mechanischer Entwässerungsverfahren liegen jedoch bei höchstens 30 bis 35 %. Weitergehende Entwässerung erfordert Energie aufwändige 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 Molke-*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 soll nebst der technischen Machbarkeit auch die Wirtschaftlichkeit der Anlage aufzeigen und wichtige Grundlagen für die Übertragbarkeit auf andere Standorte liefern.

Vorstudie der Machbarkeit einer Grüngut-Vergärungsanlage [14]: Die Vorstudie soll die Machbarkeit einer Grüngut-Vergärungsanlage im Vergleich zu einer Kompostieranlage für den Standort Münsingen abklären. Insbesondere ist auch die Organisation der Logistik für die Gemeinde zu beachten.

Teilstatistik Biogas – Erfassung Biogasdaten aus kommunalen ARA [15]: In Zusammenarbeit mit dem BUWAL wurden in einer Umfrage bei den Abwasserreinigungsanlagen (ARA) zusätzlich die für die Teilstatistik Biogas relevanten Angaben erhoben. Die entstandene Datenbank dient als Grundlage für eine zukünftige Erhebung und Aktualisierung der Daten für die Schweizerische Teilstatistik Biogas. Die Auswertung zeigt, dass 2001 gegenüber 2000 insgesamt 3% mehr Strom und 8% mehr Wärme aus Klärgas gewonnen wurde.

Systemvergleich Trolley-, Diesel- und (Bio-) Gasbus [16]: Ob künftig auf der Linie 4 der Verkehrsbetriebe Winterthur mit Strom, Diesel oder Biogas gefahren wird, ist Gegenstand dieser Analyse. Sie untersucht vergleichend Wirtschaftlichkeit und ökologische Auswirkungen der drei Varianten und erläutert weitere Entscheidungskriterien. Die Auswertung dieser Analyse ergeben

eine sehr gute Bewertung des mit Biogas betriebenen Gasbusses und zeigen, dass beim Trolleybus die Wahl des Stromprodukts für die Umweltauswirkungen entscheidend ist. Mit Strom aus Wasserkraft erreicht der Trolleybus ähnliche Resultate wie der Biogasbus.

Vergärung von Pulpa aus der Kaffee-Produktion [17]: Bei der Kaffeeverarbeitung und Produktion fällt als organischer Abfall das Fruchtfleisch (Pulpa) an. Ziel dieser Studie war es, mit gezielten anaeroben Abbauprozessen das Biogaspotenzial zu ermitteln. Die Versuche haben ausserdem gezeigt, dass die organischen Inhaltsstoffe gut abbaubar sind.

Vergleich Energieumwandlungsverfahren für Gülle (ENCON) [18]: Ziel der Studie ist der Vergleich der konventionellen Güllbewirtschaftung mit Energiekonversionsarten, wie der Vergärung und der Verbrennung. Alle untersuchten Verfahren sind hinsichtlich Energieinput und -output, Wirtschaftlichkeit sowie Vor- und Nachteilen für die Praxis betrachtet worden. Die Nährstoffbilanz wird zukünftig ein unumgänglicher Entscheidungsfaktor. Daher darf sich die Auswahl des

geeigneten Konversionsweges nicht nur auf die betriebswirtschaftlichen und energiebezogenen Ergebnisse abstützen. Möglichkeiten aus Gülle Energie zu gewinnen und gleichzeitig Nährstoffe aufzubereiten, müssten vermehrt in Betracht gezogen werden.

c) Biotreibstoffe

Vorstudie „Biogas vom Bauer wird zum Treibstoff von morgen“ [19]: Das Projekt bzw. die Vorstudie untersucht die Förderung und Nutzung von Biogas als Treib- und Brennstoff aus der Landwirtschaft. Am Beispiel der Modellregion des Luzerner Mittellandes, in welchem im Schweizerischen Mittel betrachtet überdurchschnittlich hohe GVE-Dichten (GVE: Grossvieheinheit) von über 200 und lokale Konzentrationen mit bis 400 GVE pro km² zu registrieren sind, werden die technischen, logistischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten unter Berücksichtigung der umweltpolitischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen konkret aufgezeigt. Nebst einem detaillierten Biogaskataster für die Modellregion werden dabei verschiedene Betriebskonzepte und deren lokale Realisierbarkeit untersucht.

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 den Denkfabriken 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* mit den Tasks *Verbrennung*, *Vergasung* und *Vergärung* sind in unveränderter Art weiterverfolgt worden. Auch die EU nimmt mit ihren zahlreichen Programmen zukünftig eine immer wichtigere Rolle ein. Doppelspurigkeiten in der Zusammenarbeit mit EU und IEA sind vorhanden. Um diese zu vermeiden, wird die Zusammenarbeit mit der EU verstärkt und die Aktivitäten in der IEA zurückgefahren. Unter den aufgeführten Internet-Adressen können zahlreiche Berichte und Informationen heruntergeladen werden:

www.ieabioenergy.com:

Homepage der IEA Bioenergy

www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37:

IEA Task 37: Energy from Biogas and Landfill Gas

www.ieabioenergy-task32.com:

IEA Task 32: Biomass Combustion and Co-firing

<http://www0.gastechnology.org/pub/iea>:

IEA Task 33: Thermal Gasification of Biomass

www.gasnet.uk.net:

EU Biomass Gasification Network

Pilot- und Demonstrationsprojekte

a) Biomasse verbrennen und vergasen

Ziel des Projektes **NOS** [20] ist die Minderung der NO_x- und Staub-Emissionen für kleinere Anlagen von ca. 50 kW bis 350 kW in einem vertretbaren finanziellen Aufwand. Untersucht wird ein Modul, das in einer Anlage integriert ist oder nachträglich eingebaut werden kann. Ab Februar 2003 sind die ersten Messungen vorgesehen.

Beim Projekt **Abgaskondensation am Wärmeverbund in Schwanden** [21] soll in der Heizsaison 2002/2003 die Abgaskondensation auf ihre Effizienz getestet werden. Auch werden Staubmessungen vorgenommen um die Reduktion der PM₁₀ zu erfassen. Der Messbericht wird im Sommer 03 veröffentlicht werden.

Die **Holzvergasungsanlage der Xylowatt SA** [22] hat letzten Sommer nach rund 600 h Laufzeit den Betrieb eingestellt. Es konnte gezeigt werden, dass das Zusammenspiel der einzelnen Anlagenteile gut funktionieren und die Anlage einen hohen Automatisierungsgrad aufweist. Jedoch ist ein wirtschaftlicher Betrieb nicht möglich. Auch einzelne Teile sind noch zu modifizieren und die Leistung des Motors ist zu erhöhen. Die Modifikationen sollen 2003 durchgeführt werden.

Das Projekt **Optimierung eines Gleichstromvergasers im industriellen Massstab für die Vergasung von feuchten Holzschnitzeln und Altholz sowie Entwicklung der trockenen Gasreinigung** [23] erlebt weiterhin erhebliche Verzögerungen. Die im Zusammenhang mit der Heizungserneuerung im AC-Zentrum Spiez installierte, vollständig im System eingebundene Vergaser-Pilotanlage konnte nach 2200 Betriebsstunden auf halber Leistung dem Endkunden nicht übergeben werden. Technische und wirtschaftliche Probleme lassen das weitere Vorgehen weiterhin offen.

b) Biogene Abfälle vergären

Bioenergie, Protein und Fasern aus Gras [24]: Diese Demonstrationsanlage mit kombinierter Wertschöpfung aus Biogas (Treibstoff für BHKW und Einspeisung ins Gasnetz) und aus vermarktbareren Halbfabrikaten (Fasern und Proteinen) soll ein breites Publikum für die wirtschaftlichen und energetischen Möglichkeiten des nachwachsenden Rohstoffes Biomasse sensibilisieren. Die Anlage hat im Oktober 2001 den Betrieb aufgenommen und produziert als weltweit erste Anlage, mit einer jährlichen Verarbeitungskapazität von 5000 t

Trockensubstanz Gras, Fasern für die Wärmeisolation und **GreenPOWER** (Ökostrom und Biogas). Obwohl im Berichtsjahr noch etliche Umbauten und Optimierungen an der Anlage vorgenommen werden mussten, sind die Produkte bereits erfolgreich im Markt eingeführt worden.

Perkolationsanlage zur Aufbereitung von Grünabfällen [25]: Das Perkolationsverfahren wurde bereits für Restmüll eingesetzt. Für das Aufbereiten von rein organischen Abfällen zeichnet sich eine zukunftsweisende, kostengünstige Lösung ab. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Effizienz der Perkolationsanlage von Grünabfällen durch Optimierung chemisch-physikalischer, verfahrenstechnischer und mechanischer Parameter deutlich zu steigern. Die Versuche wurden in einer Perkolationsanlage im Pilotmassstab durchgeführt. Durch die geeignete Wahl von Waschwassermenge, Belüftungsrate und der mechanischen Parameter konnte die aerobe Hydrolyse optimiert und dadurch die Menge an ausgewaschenem CSB (chemischer Sauerstoffbedarf) um das 7-fache gesteigert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass Grünabfälle mittels einer Perkolationsanlage effizient behandelt werden kann. Das Verfahren hat den Vorteil, dass die Behandlung des Abfallmaterials innert 4 Tagen vollzogen ist; herkömmliche Biogasanlagen benötigen dafür eine Verweilzeit von 20-25 Tagen.

Mikroturbine 100kW an Biogasanlage [26]: Um Biogas in Zukunft wirtschaftlicher und effizienter zu nutzen wurde dieses Projekt im Rahmen des Programms Biomasse vom BFE initiiert. Die Mikroturbinen stellen durch ihr grundsätzlich einfaches Wirkprinzip, ihre kleine Baugrösse und die langen Wartungsintervalle eine attraktive Lösung dar. Die ersten Versuchsergebnisse im Dezember 2001 waren vielversprechend. Während der anschliessenden Testphase im Berichtsjahr sind jedoch unter anderem Kondensationsprobleme aufgetreten, die trotz Reparaturversuchen schliesslich zur Zerstörung eines der Kompressoren führte. Als Ergebnisse aus England bekannt wurden, die mit baugleichen Kompressoren ähnliche Probleme hatten, wurde entschieden, das Projekt ruhen zu lassen, bis eine taugliche Lösung für die Gasaufbereitung gefunden ist.

Die Vorstudie **Energiebilanz und Biogas-Anlage für die Käseerei Bettex in Champtauraz** [27] hat als Ziel nach einer im Jahr 2000 ausgeführten Machbarkeitsstudie eine Biogas-Demonstrationsanlage zur Verarbeitung von jährlich ca. 6000 t

Rinder-, Schweine-, Ziegen- und Pferdemit zu errichten und darauf zu untersuchen, wie das erzeugte Biogas den Energiebedarf des grössten Ziegenkäseproduzenten der Schweiz (Käserei *Betex*, Champstauroz) am wirkungsvollsten deckt.

Betriebsauswertung der landwirtschaftlichen Kompaktbiogasanlagen [28]: Der Jahresbericht zeigt zusammenfassend die Betriebserfahrung und den aktuellen Stand der Kompaktbiogasanlagen in der Schweiz auf. Daraus abgeleitet darf man den Betrieb einer Biogasanlage allgemein als knapp wirtschaftlich bezeichnen. Diese Aussage basiert auf den betrieblichen und wirtschaftlichen Erfahrungen der realisierten Anlagen. Insgesamt werden vom BFE 15 Anlagen unterstützt, davon sind 9 in Betrieb oder kurz vor der Fertigstellung.

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. Die Anlage erreicht ihre Nennleistung nicht, da die garantierte Menge von beschickbarer Biomasse – hauptsächlich wegen Problemen mit dem Feststofffermenter – deutlich unterschritten wird. Mit den ersten Betriebsoptimierungsmassnahmen, insbesondere der Behebung des Selenmangels im

Feststofffermenter, welcher die Biologie verlangsamte, konnte die Biogasproduktion bereits um erfreuliche 10% gesteigert werden. Das Projekt hat sich jedoch im Berichtsjahr von einer reinen Betriebsoptimierung mit Erfolgskontrolle zu einem Anlagenumbau in grösserem Rahmen gewandelt. Mit diesem Umbau wird eine beträchtliche Steigerung der Strom- und Wärmeproduktion möglich.

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.

Biogas-Verwertung aus der Lagergrube, Anlage Wartmann Bissegg [31]: Bei der bestehenden landwirtschaftlichen Biogasanlage wurde die Lagergrube abgedeckt, so dass das durch die Nachgärung anfallende Biogas genutzt werden kann. Der entsprechend höhere Ertrag konnte in einer ersten Messreihe nachgewiesen werden.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Verbrennung: Nach den erfolgreichen Rückmeldungen der Vorphase des Projekts *Systemoptimierungen* werden nun weitere rund 25 Holzfeuerungen grösserer Leistung auf Qualität und Wirtschaftlichkeit untersucht. Bei Klein-Holzfeuerungen wurden für Niedrigenergiehäuser Systeme entworfen und einige ausgemessen. Diese Arbeiten werden weitergeführt und allfällige Produkte auf die Markteinführung vorbereitet. Bei der Fachhochschule Beider Basel (FHBB) wird im Rahmen des BRENET eine akkreditierte Prüfstelle 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.

Bei der **Vergasung:** konnten die Arbeiten wegen wirtschaftlicher Umstände nicht wie vorgesehen realisiert werden. Die Rahmenbedingungen für diese Technologie verschlechtern sich weiter. Es wird nun versucht, verkaufsfähige Produkte vorzubereiten und Langzeiterfahrungen zu sammeln.

Vergärung: Der Bau von landwirtschaftlichen Kompakt-Biogasanlagen gestaltet sich weiterhin positiv; die Co-Vergärung hat sich bei landwirtschaftlichen Anlagen und bei den ARA in der Praxis durchgesetzt. Landwirtschaftliche Biogasanlagen können in der Regel nur mit Co-Vergärung wirtschaftlich betrieben werden. Mit Ausnahme von einigen industriellen Vergärungsanlagen, wo Biogas auf Erdgasqualität aufbereitet und als Treibstoff eingesetzt wird, werden heute generell 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. Im Zusammenhang mit Biogas als Treibstoff kommt vermehrt auch die Idee der virtuellen Einspeisung auf. Dabei würde das Biogas nicht physisch ins Erdgasnetz eingespeist, sondern mittels BHKW zu Strom umgewandelt und an Stelle eines Verkaufs als Ökostrom energieäquivalent als Biogas im Erdgasnetz angerechnet.

Im Berichtsjahr konnte in Otelfingen der Kompogas Info-Park eröffnet werden. Das von Bundesrat

Leuenberger offiziell eröffnete Informationszentrum zeigt sehr anschaulich den Stoffkreislauf und die Möglichkeiten zur Nutzung der gewonnenen Energie (Treibstoff, Strom und Wärme).

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.

Die Erfahrungen mit dem Betrieb von Pilot- und Demonstrationsanlagen zeigen, dass in verschiedenen Bereichen die **Rahmenbedingungen** für die energetische Nutzung der Biomasse nicht optimal sind. Es sind dies insbesondere folgende Fragen, die im Hinblick auf eine Zunahme der Biomassenutzung geklärt werden müssen:

- Befreiung biogener Treib- und Brennstoffe von der Mineralölsteuer
- Konflikte mit der Zonenkonformität (landwirtschaftliche Betriebe mit Co-Vergärung als „Abfallentsorger“)
- vereinfachte Bewilligungsverfahren für Betriebe mit Co-Vergärung (UVP-Pflicht, Sonderabfallbewilligungen etc.)

Die Verbesserung der Rahmenbedingung wird ein Schwerpunkt des Bereichs *Biomasse* für 2003 sein. Für die Forschung bedeutet dies, dass eine

neue Biomasse-Potenzialstudie in Angriff genommen wird. Im Weiteren soll die Ämter übergreifende Diskussion zum Thema Biomasse gefördert werden, um die 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. Ausserdem müssen Konzepte wie die virtuelle Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz diskutiert werden.

Eine Verschiebung von der Forschung hin zu einer vermehrten Realisierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen wurde angestrebt, was auch für das Jahr 2003 die allgemeine Stossrichtung bleibt. Zudem wird 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. Bei P+D-Projekten werden in Zukunft vermehrt Anstrengungen bei der Realisierung von Grossanlagen im Bereich Vergärung und Verbrennung unternommen. Unter diesen Aspekten wird im kommenden Jahr das Konzept 2004 bis 2007 für das Programm *Biomasse* erstellt.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

(*) Bericht nicht publiziert

ENET: Bestellnummer des Berichts unter www.energieforschung.ch bei ENET-Dokumentation unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden.

- [1] Th. Nussbaumer (verenum@access.ch), VERENUM, Zürich: **a) Herstellung und Eigenschaften von Holzpellets als Brennstoff** (SB) ♦ **b) IEA, Bioenergy Agreement Task 19 Biomass Combustion** (JB) ♦ **c) Grundlagen der Aerosolbildung** (JB) ♦ **d) Systemoptimierung automatischer Holzfeuerungen** (JB) ♦ **e) Potenzial des Gegenstromvergaser als schadstoffarme Holzfeuerung** (JB) ♦ **f) 7. Holzenergie Symposium** (SB)
- [2] R. Bühler (rbbuehler@mus.ch), Maschwanden: **IEA Task 33, Thermal Gasification of Biomass** (JB)
- [3] Ch. Gaegauf (gaegauf@oekozentrum.ch), ÖKOZENTRUM, Langenbruck: **a) Erfolgskontrolle für Ortsgesetzte Speicheröfen** (SB) ♦ **b) Auslegung und Optimierung von Holzspeicheröfen** (JB)
- [4] Dr. Peter von Böckh (p.vonboeckh@fhbb.ch), FHBB, Muttenz und Ch. Gaegauf, ÖKOZENTRUM, Langenbruck: **akkreditierte Prüfstelle für Holzfeuerungen**

- [5] H. Huber (hjhuber@hta.fhz.ch), HTA Luzern, Horw: **Entwicklung neuartiger Holz-Hybrid-heizsysteme** (SB)
- [6] Y. Membrez (erep@iprolink.ch), EREP, Aclens: **Valorisation énergétique (biogaz) d'huiles comestibles usagées par codigestion avec différents déchets d'origine agroalimentaire** (SB); **ENET Nr. 220149 • b) Mandat EU Centre Information Biogaz** (SB)
- [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: **Kennwertmodell für die Stromproduktion aus landwirtschaftlichem Biogas** (SB)
- [9] E. A. Müller (mueller.eam@bluewin.ch), Felix Schmid, Beat Kobel, Martin Kernen, Energie in ARA, Büro eam, Zürich: **Ökobilanz von Strom aus Klärgas** (JB); ENET Nr. 220257
- [10] U. Schafhausen (info@let-con.ch), LET-CON.AG, Zermatt: **Vorstudie Grüngutvergärung Zermatt** (*)
- [11] Informationsstelle Biomasse (info@ebp.ch), Ernst Basler + Partner, Zollikon: **Finanzierung von Biogasanlagen in der Landwirtschaft** (Entscheidungshilfe für Landwirte: kann unter www.biomasseenergie.ch bezogen werden)
- [12] O. Fischli (ofischli@active.ch), energieprojekte fischli, Näfels: **Messkampagne für eine solare Klärschlamm-trocknungsanlage in Bilten GL** (JB)
- [13] O. Kohle (kohle@freesurf.ch), KohleNusbaumer, Lausanne: **Molke-Biogasanlage mit BHKW für die Molkerei Lateria Engadina (LESA) in Bever** (SB)
- [14] R. Estermann, Composto+, Suhr: **Vorstudie der Machbarkeit einer Grüngut-Vergärungsanlage** (*)
- [15] R. Buri, Beat Kobel (beat.kobel@rysering.ch), Ryser Ingenieure AG, Bern: **Teilstatistik Biogas – Erfassung Biogasdaten aus kommunalen ARA** (SB)
- [16] R. Aberhalden (info@wv-winterthur.ch), Verkehrsbetriebe Winterthur, Winterthur: **Systemvergleich Trolley-, Diesel- und (Bio-)Gasbus** (JB)
- [17] M. Hofmann (m.hofmann@hswzfh.ch), Urs Baier, Hochschule Wädenswil (HSW), Wädenswil: **Vergärung von Pulpa aus der Kaffee-Produktion** (JB)
- [18] J.-L. Hersener, U. Meier, ARGE ENKON: Ingenieurbüro HERSENER, Wiesendangen: **Vergleich Energieumwandlungsverfahren für Gülle (ENCON)** (SB); ENET Nr. 220205
- [19] U. Brücker (ub@itz.ch), R. Limacher, ARGE SwissFarmerPower, Horw: **Vorstudie „Biogas vom Bauer wird zum Treibstoff von morgen“** (JB)

Liste der P+D-Projekte

- [20] B. Salerno (basso.salerno@sesolar.ch), Salerno Engeler GmbH, Langenbruck: **NOS** (JB)
- [21] L. Bertozzi (bertozzi@raytec.com), H. Baumgartner, Schwanden: **Abgaskondensation am Wärmeverbund in Schwanden** (JB)
- [22] P. Giordano, Xylowatt, Châtel-St-Denis: **Holzvergärungsanlage der Xylowatt SA** (SB)
- [23] B. Meyer (welcome@pyroforce.ch) et al., Pyroforce, Emmenbrücke: **Optimierung eines Gleichstromvergaseres 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** (JB)

- [25] Ch. Widmer, G. Schober (gabriele.schober@novaenergie.ch), AFAG/FAT Basel/Tänikon: **Perkolationsanlage zur Aufbereitung von Grünabfällen** (JB)
- [26] Markus Widenhorn (markus.widenhorn@ch.abb.com), ABB Energie Services Schweiz; Daniel Würgler, Kompogas AG; Zürich/Glattbrugg **Mikroturbine 100kW an Biogasanlage** (JB)
- [27] Y. Membrez (erep@iprolink.ch), EREP, Aclens: **Bilan énergétique et avant-projet d'installation de biogaz pour la fromagerie BETTEX, Chптаuroz** (SB); ENET Nr. 220261
- [28] T. Böhni (energie-umwelt@econophone.ch), ENERGIE & UMWELT, Frauenfeld: **Kompakt-Biogasanlage 5+7 Zusammenfassung und Betriebsauswertung der Anlagen** (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** (*)
- [30] Thomas Böhni (energie-umwelt@econophone.ch), Energie und Umwelt GmbH, Frauenfeld: **BHKW-Optimierung und SCR-Katalysator Kompaktbiogasanlage Küssnacht** (*)
- [31] O. Wartmann (wartmann@active.ch), H. Engeli, engeli engineering, Neerach: **Biogasverwertung aus der Lagergrube, Anlage Wartmann Bissegg** (JB)

Referenzen

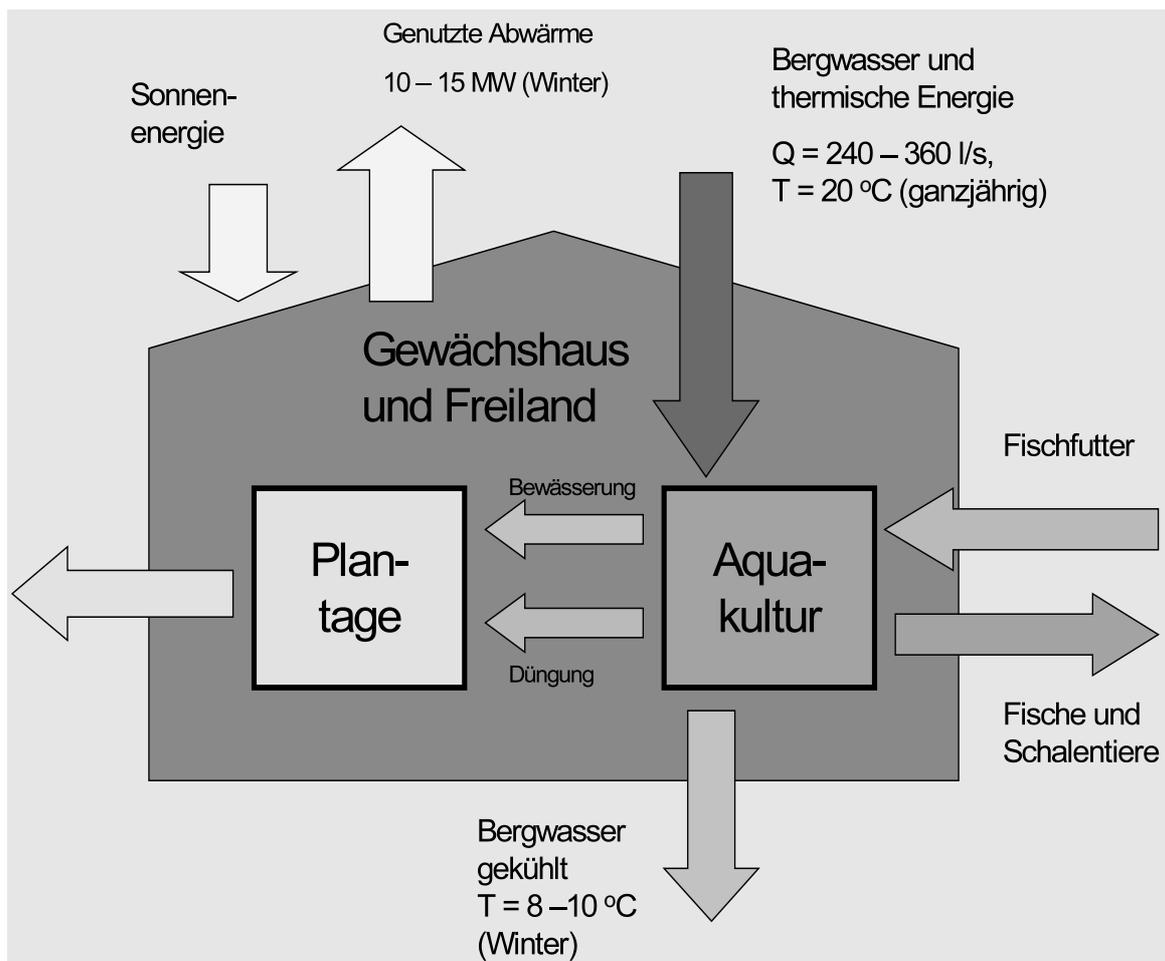
- [32] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2000 – 2003**, ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, www.energie-schweiz.ch, Rubrik Forschung; Konzepte

GEOthermie

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2002

Harald L. Gorhan

harald.gorhan@ewe.ch



Innovative Nutzung von warmen Tunnelwässern aus den beiden AlpTransit-Röhren:

Schematische Darstellung von Energieflüssen in einem Treibhaus zur Produktion von tropischen Frucht- und Zierpflanzen sowie von Speisefischen.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Forschungsschwerpunkte des Programms *Geothermie* sind:

Entwicklung der Hot-Dry-Rock / Hot-Wet-Rock-Technologie (HDR-/HWR-Technologie) zur Strom- und Wärmeproduktion in der Schweiz im **Deep-Heat-Mining-Projekt** (DHM-Projekt). Bisherige Experimentieranlagen haben die Funktionstüchtigkeit des Prinzips des Hot-Fractured-Rock-Verfahrens bewiesen. Die geplante Anlage in Basel soll Vorbild für ähnliche Nachfolgeprojekte sein (z.B. Genf, Lausanne, Zürich) und einen neuen Markt für zuverlässige, saubere und nachhaltige Energie eröffnen. Für die Zukunft dürfte dieses Projekt exportfähiges Know-how und Arbeitsplätze für hochqualifiziertes Personal schaffen. Es ist geplant 2008 mit der Wärme- und Stromproduktion zu beginnen (installierte Leistungen: 20 MW_{th} und 3 MW_{el}). Die internationale Einbindung ist durch die intensive Zusammenarbeit mit der IEA bzw. mit dem EU-Geothermieprojekt in Soultz-sous-forêts gegeben.

AlpTransit, Wärmenutzung von warmen Tunnelwässern: der Wissensstand über die Wärmepotentiale und generellen Nutzungsmöglichkeiten der beiden Tunnelröhren konnte in zusammenfassender Form auf ein vergleichbares Niveau gebracht werden. Detaillierte Machbarkeitsstudien laufen zur Zeit am Lötschberg Nord-Portal und am Gotthard Süd-Portal. In diese Untersuchungen eingeschlossen sind die Verwendungsmöglichkeiten für den Betrieb von Treibhäusern (siehe Titelblatt); als Referenzprojekt dient das bereits bestehende Tropenhaus in Ruswil (LU). Nach eher konservativen Potentialabschätzungen sollte pro Portal eine Leistung von 3 bis 4 MW_{th} für eine Nutzung zur Verfügung stehen.

Bezüglich Forschung **untiefe Geothermie** stehen Untersuchungen über den Langzeiteffekt von Mehrfach-Erdwärmesonden, die Lebens-

dauer von Erdwärmesonden (EWS) in Bezug auf Druckverhältnisse bzw. Hinterfüllung, und besonders wichtig, die Qualitätssicherung bei Energiepfahlanlagen und EWS-Anlagen mittels geothermischen Response-Tests im Mittelpunkt.

Schwerpunkte des Programms für **Pilot- und Demonstrationsanlagen** sind:

- In allen Regionen der Schweiz stehen wirtschaftlich und energetisch vorbildliche geothermische Anlagen aller wichtigen Typen in Betrieb. Deren energetische und wirtschaftliche Kenndaten sind überprüft und publiziert.
- An jedem der vier AlpTransit-Portale ist mindestens ein Projekt zur Nutzung des Tunnelwassers realisiert worden. Die energetischen und wirtschaftlichen Daten sind überprüft und publiziert.
- Die Qualitätssicherungsinstrumente im Bereich Geothermie sind entwickelt, überprüft und eingeführt.

Zur Umsetzung dieser Ziele werden die Aktivitäten im P+D-Bereich unter den folgenden Schwerpunkten durchgeführt:

- Erarbeitung von Gefahrenkarten für alle Regionen der Schweiz
- Aufbau und Einführung einer breit abgestützten Qualitätskontrolle für die Auslegung von komplexen Anlagen zur Nutzung der Erdwärme
- Verstärkung der Zusammenarbeit mit dem Bereich Gebäudetechnik (Erdberührte Bauteile, Energiepfähle, Betonkerntemperierung)
- Generelle Förderung von innovativen Konzepten der Erdwärmenutzung (z.B. Treibhäuser zur Nutzung von warmen Tunnelwässern)

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

DEEP HEAT MINING

Deep Heat Mining; Entwicklung der Hot-Dry-Rock / Hot-Wet-Rock Technologie in der Schweiz; 2002 [1a]: Als definitiver Anlagestandort wurde der IWB-Werkhof Kleinhüningen gewählt (IWB: Industrielle Werke Basel). Ein Kon-

zept zur Einbindung dieses Standorts in das Fernwärmenetz ist erarbeitet. Seitens der Basler Regierung wird ein Rahmenkredit von 40 Millionen Franken über das Gesamtprojekt als Beteiligung des Kantons und der IWB in Aussicht gestellt. Damit wäre die Finanzierung des Gesamtprojektes zur Hälfte gesichert.

Deep Heat Mining; Teilprojekt „Monitoring Station“ [1b]: Die Monitoring Station in der Bohrung Otterbach 2 bildet ein zentrales Glied eines seismischen Beobachtungsnetzes, das verschiedenen Anliegen Rechnung trägt: es sollen sowohl natürliche seismische Ereignisse in der weiteren Region, als auch mikroseismische Ereignisse im zu erschliessenden Reservoir aufgezeichnet werden. Ein Instrumentierungskonzept wurde gefunden, das allen Ansprüchen gerecht wird, d.h. eine genügende Redundanz aufweist und speziell im Unterhalt kostengünstig ist.

Deep Heat Mining; Entwicklung der Hot-Dry-Rock/Hot-Wet-Rock Technologie in der Schweiz; 2002. Investigations relatives à l'implantation d'une centrale DHM à Genève [1c]: Une première évaluation a permis de retenir sept zones présentant des caractéristiques plus favorables que les autres, essentiellement du point de vue du voisinage. Ces secteurs sont Avanchets, Poussy, Satigny, Bois de Bay, Les Teppes-Bossonettes, Boiruails et St. Georges. On a procédé à une analyse plus détaillée des zones, afin d'en retenir un ou deux, dans le but de pouvoir établir l'avant-projet d'un forage d'exploration à mi-2003. La planification énergétique et l'étude de l'insertion du système dans le réseau genevois ont été lancées en juillet 2002, avec l'intervention notamment des *Services Industriels de Genève* et du Service cantonal de l'énergie. Dans un premier temps un plan de travail a été préparé, avec comme but la collecte des données concernant les réseaux et les chiffres de consommation actuels et projetés et l'élaboration du concept général d'un système DHM avec des variantes. Ce travail se poursuivra pendant la première moitié de 2003.

Teilnahme am Geothermal Implementing Agreement der IEA [2]: Prof. Dr. L. Rybach has decided this year to step down from his post as Chairman of the Executive Committee of the Geothermal implementing Agreement, but agreed to remain in the organisation as Vice-chairman, and to continue to be the Swiss representative in the ExCo. The inventory of surface equipment and infrastructure requirements has been continued and refined using data from literature and from the DHM-Basel project. The studies on the energy system include a compilation of basic parameters for a typical HDR-plant with a reservoir accessed by one injection and two extraction holes. Where possible, minimum, maximum and design point values are given. First preliminary studies of power plants include power only, combined heat and power and heat-only-plants. Besides purely geothermal power plants, also combined systems

with gas turbine topping cycle and *organic rankine bottom cycle* are being studied.

ERDWÄRMESONDEN UND ENERGIEPFÄHLE, QUALITÄTSKONTROLLE

Langzeiteffekt von Mehrfach-Erwärmesonden (EWS) [3]: Da die Anzahl der installierten Erdwärmesonden auch künftig wachsen wird, kommt der Fragestellung nach der langfristigen gegenseitigen Beeinflussung eine zentrale Bedeutung zu, insbesondere im Hinblick auf Bewilligungs- und Nachhaltigkeitsfragen. Detaillierte Resultate liefern numerische Berechnungen mit finiten Elementen oder finiten Differenzen. Sinkt auf Grund einer bestimmten Konfiguration von mehreren Erdwärmesonden die Verdampfertemperatur in der Wärmepumpe um 2 K, so reduziert sich die Jahresarbeitszahl (JAZ) um etwa 0.15-0.20, was etwa 5% einer typischen Jahresarbeitszahl von 3 bis 4 entspricht. In diesem Fall würde das System bei gleich bleibender Wärmeabgabe etwa 5% mehr Strom benötigen.

Arteserkarte der Schweiz – Teilgebiet Basel – Luzern [4]: Immer wieder kommt es vor, dass beim Abteufen von Bohrungen für das Erstellen einer Erdwärmesonden-Anlage artesisch gespanntes Grundwasser angebohrt wird. Aus Gründen des Gewässerschutzes müssen solche Bohrungen abgedichtet werden, um das unkontrollierte Ausfließen des Grundwassers zu verhindern. Je nach Bewilligungspraxis der zuständigen Behörden müssen dann mehrere aber kürzere Sonden gebohrt werden; eventuell muss auf eine Erdwärmenutzung sogar gänzlich verzichtet werden. Dadurch resultieren beträchtliche Mehrkosten bzw. eine suboptimale Auslegung der Erdwärmesonden-Anlage. Um diese Risiken bzw. Mehrkosten zu minimieren und das Entstehen von Schäden zu vermeiden, soll eine Arteserkarte der Schweiz entwickelt werden. Diese zeigt auf, wo das Auftreten von artesisch gespanntem Grundwasser nach den vorliegenden Kenntnissen unwahrscheinlich ist. Ausserdem soll ein Leitfaden über den Umgang mit Artesern erarbeitet werden.

Finalisation du module de l'EPFL pour les tests de réponse [5]: Le module pour réaliser les tests de réponse en possession de l'EPFL avait bénéficié en 1998 pour son développement d'un soutien financier de l'OFEN. Ce prototype a été utilisé tel quel sur le chantier de l'EPFL (pour un test sur le comportement thermo-mécanique d'un pieu) et pour un autre test de réponse où il a donné entière satisfaction. Ces essais ont également démontré les possibilités et la fiabilité de cet appareillage.

Workshop zur Qualitätssicherung von geothermischen Response Tests [6]: Für die Auslegung von Erdwärmesonden ist die Kenntnis der thermischen Eigenschaften des Untergrunds eine wesentliche Voraussetzung. Während diese Werte bei kleinen Anlagen meist geschätzt werden oder die Auslegung nach Erfahrungswerten vorgenommen wird, sind für grössere Anlagen Untergrunduntersuchungen bis hin zu Probebohrung(en) erforderlich. Über solche Probebohrungen lässt sich die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds z.B. durch einen thermischen

Response Test (an einer fertig eingebauten Erdwärmesonde) bestimmen. Vorteile sind die Messung über die gesamte Bohrlochlänge und der Einbezug der Hinterfüllung sowie der natürlichen Untergrundverhältnisse einschliesslich evtl. vorhandener Grundwasserflüsse. Das mathematisch-physikalische Konzept der Testauswertung muss mit jenem der Anlage-Auslegung identisch sein. Es ist unzulässig, Parameter, welche mit Hilfe der Linienquellen Methode bestimmt worden sind, in Auslegungsprogrammen zu verwenden, welche auf numerischen Modellen basieren.

Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr, wurde mit den folgenden Schweizer Institutionen eng zusammengearbeitet:

- **Universitäten und Fachhochschulen:** Institut für Geophysik der ETHZ, Centre d'hydrogéologie de l' Université de Neuchâtel, Département de génie civil, Institut des sols, roches et fondations de l' EPFL, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie de la Université de Genève, Instituto di scienze della terra e laboratorio di energia, ecologia ed economia della scuola universitaria della Svizzera italiana, Haute école valaisanne und der Fachhochschule Burgdorf;
- **Stromindustrie:** BKW, ATEL, Elektra Basel-land, Industrielle Werke Basel

- **Agenturen und Fachverbände:** Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz (AEE), Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW), Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS), building and renewable energies network of technology (brenet);
- **Energiefachstellen:** Zusammenarbeit mit alle Energiefachstellen in der Romandie und im Tessin und mit denjenigen der grösseren deutschsprachigen Kantone
- **Zahlreiche Stadt- und Gemeindevertretungen.**

Internationale Zusammenarbeit

Teilnahme am **Geothermal Implementing Agreement der IEA**.

Teilnahme an folgenden zwei EU-Geothermie-Projekten:

- **Fluid-rock interactions and geochemical modelling of the formation brine in the fissured reservoir of Soultz-sous Forêts HDR test site** (EC JOR3-CT98-0313, BBW # 98.0008-3).
- **Data analysis and controls towards understanding reservoir behavior and the creation of a conceptual reservoir model** (EC JOR3-CT98-0313, BBW # 98.0008-1).

Im Ausland wurden von Herrn Prof. L. Rybach die folgenden Vorträge gehalten:

- **Sustainability aspects of geothermal heat pumps**, Twenty-Seventh Workshop on

Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford/CA, USA, 28.01.02.

- **Workshop "Geothermische Stromerzeugung – eine Investition in die Zukunft"**, Landau Deutschland, 21.06.02.
- **Eastern Mediterranean: the geodynamic and geothermal framework**, International Geothermal Days Greece 2002, Milos/Greece, 05.09.02.
- **Geothermal energy: a suitable choice for isolated/island communities**, International Geothermal Days Greece 2002, Milos/Greece, 06.09.02.
- **Umweltaspekte der geothermischen Stromerzeugung**, VDI-GET Workshop Geothermische Stromerzeugung 2002, Potsdam/ Deutschland, 18.10.02.

- **Geothermal energy: sustainability, environment, and the Olympic Park in Beijing, China – a summary**, 2002 Beijing Interna-

tional Geothermal Symposium *Geothermal and the 2008 Olympics in Beijing*, Beijing/China, 30.0.02

Pilot- und Demonstrationsprojekte

ERDWÄRMESONDEN UND ERDWÄRMESONDEN-FELDER

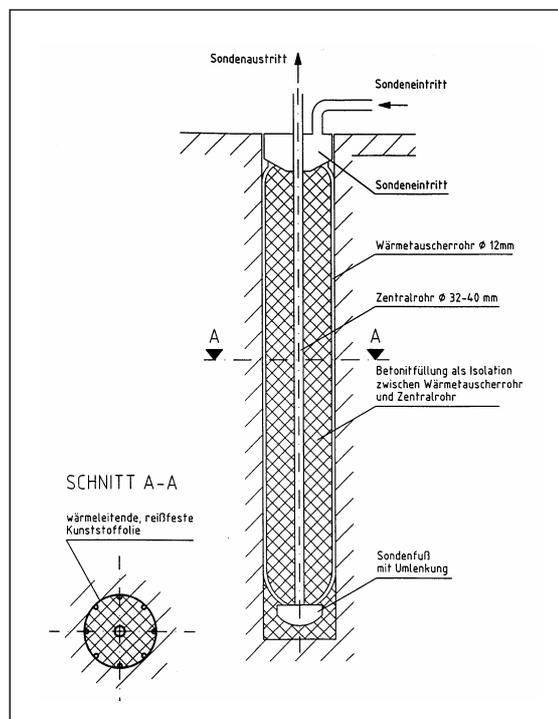
Misure di un impianto di riscaldamento con sonda geotermica a Lugano (TI) [7]: Le apparecchiature per la misurazione, installate durante la realizzazione dell'impianto, hanno raccolto dati già dal primo anno e mezzo di funzionamento dell'impianto senza perdere una sola misura. Le apparecchiature permettono di misurare con precisione le buone prestazioni energetiche dall'impianto. Durante il primo anno di misure, sono stati rilevati i seguenti valori caratteristici:

- potenza d'estrazione media per metro sonda: 52 W/m
- energia annuale estratta per metro sonda: 99 kWh/m
- energia annuale iniettata per metro sonda (energia solare): 18 kWh/m
- energia termica annuale prodotta dalla pompa di calore: 30'700 kWh
- coefficiente di prestazione (COP) medio senza pompe di circolazione: 4.1
- coefficiente di prestazione (COP) medio con pompe di circolazione: 3.8
- livello di temperatura medio all'uscita del condensatore: 44 °C
- livello di temperatura medio all'entrata dell'evaporatore: 8 °C

Il COP medio della pompa di calore di circa 4; dunque 1 kWh elettrico permette di produrre 4 kWh di calore termico per il riscaldamento. La pompa di calore ha un label di qualità e le prestazioni termiche promesse dal fabbricante sono state effettivamente riscontrate in realtà. La sensibilità del coefficiente di prestazione (COP) alla temperatura di riscaldamento elevata e mostra l'importanza di riscaldare con una temperatura più bassa possibile.

Demonstrationsprojekt zum Effizienzvergleich zwischen konventioneller (tiefen) EWS und der Neuentwicklung Regenschirm-Erdwärmesonde [8a]: Dieser Sondentyp wurde mit der Absicht entwickelt, den Wärmeträger-Vorlauf in einen möglichst guten Kontakt mit dem umgebenden Erdreich zu bringen bzw. den

Rücklauf isoliert im Zentrum der EWS zurück an die Erdoberfläche zu zirkulieren. Tatsächlich konnte eine leichte Erhöhung der Jahresarbeitszahl (JAZ) im Vergleich zu einer für die gleiche Anlage und in gleicher Tiefe (d.h. 250 m) versetzten, herkömmlichen Duplexsonde festgestellt werden. Allerdings ergab die Auswertung der Temperatur-, Druck- und spezifischen Leistungsdaten, dass die Leistung der Sonden massgeblich von Variationen der Durchflussmengen des Wärmeträgers abhängig war. Ein eindeutiger Beweis über die Überlegenheit der Regenschirm-Erdwärmesonde konnte daher (noch) nicht erbracht werden, um den Einsatz dieser doch etwas teureren Konstruktion zu rechtfertigen. Die folgende Figur 1 zeigt den Längs- bzw. Querschnitt durch eine *Regenschirm-Erdwärmesonde*, die mittels Einfüllen von Bentonit wie ein Regenschirm im Bohrloch aufgespannt wird.



Figur 1: Längs- und Querschnitt durch die Erdwärmeregenschirmsonde

Demonstrationsprojekt zur Energieeffizienz einer grossen Wohnüberbauung (Unteres Hompeli, SG) im Minergie-Standard [8b]:

Die Überbauung *Unteres Hompeli* besteht aus 4 Häusern, für deren Wärme-Energieversorgung insgesamt 11 EWS mit einer Gesamtlänge von 2'495 m Länge installiert wurden. Anfangs 2002 konnte von der EPFL für diese Anlage ein Respons Test durchgeführt werden. Mit den Kontrollmessungen wurde begonnen, der Schlussbericht ist im Sommer 2005 fällig.

Wirtschaftlichkeitsermittlung einer Sondenisolation im obersten Abschnitt einer EWS-Anlage in Otelfingen (ZH) [9a]: Es wurde die Wärmeproduktion und Wirtschaftlichkeit von einer nicht isolierten mit einer isolierten EWS-Anlage verglichen. Bei letzterer wurden die obersten 20 m sowohl des Sondenvor- als auch der Sondenrücklaufs mit einer Wärmeisolation versehen, um den Kälteeinfluss im Winter zu eliminieren. Beide EWS weisen je eine Tiefe von 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 etwas erhöhten Investitionskosten werden rasch durch geringere Betriebskosten kompensiert.

WP – Anlage Chestonag Automation AG, Seengen (AG) [9b]: Für die 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 wärmeisoliert 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 [9c]: 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. Dabei wurden zum Effizienzvergleich die obersten 8 m der EWS von einer Reihe isoliert und die der anderen Reihe nicht isoliert. Die diversen Installationen für die Messüberwachung konnten in diesem Jahr durchgeführt werden, inklusive eines geothermischen Response Tests durch die EPFL. Die Erfolgskontrolle (zweijährige Messkampagne) läuft bis Dezember 2004.

WÄRMENUTZUNG GEOSTRUKTUREN (ENERGIEPFÄHLE)

Exploitation de la chaleur terrestre par des géostructures énergétiques. Méthodologie

de détermination des zones potentielles [10]: Cette étude se focalise sur l'exploitation de la chaleur terrestre par les géostructures énergétiques. Les géostructures sont des ouvrages en béton, en contact avec le sol, servant de fondation à une construction ou de soutènement. Les trois grands types de géostructures sont les pieux, les parois et les dalles. Ces structures peuvent être équipées d'un réseau de tubes dans lesquels circule un fluide caloporteur qui permet l'échange de chaleur avec le sol. On les appelle dans ce cas des géostructures énergétiques. Cette technologie est encore peu répandue en Suisse romande, d'où l'objectif de cette étude qui est de permettre son développement en fournissant une méthodologie, basée sur des critères, pour l'identification et la sélection des zones potentielles à sa réalisation.

Regionalgefängnis Rheintal, Altstätten (SG): Beheizung und Klimatisierung mittels Energiepfählen, gekoppelt mit Erdwärmesonden [11]: 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 abgeteufelt. Die Durchführung der Null-Messungen ist gestartet worden und der Schlussbericht ist im Herbst 2003 fällig.

Pieux énergétique avec distribution de chaleur et de froid intégrée dans la structure: Centre Scolaire Ver-l'Eglise / Fully [12]: La volonté de réaliser l'école *Vers l'Eglise* de Fully selon le standard MINERGIE a orienté le système de production de chaleur vers un ensemble de quatre pompes à chaleur. Vu que, pour des raisons de stabilité géologique, le bâtiment repose sur 118 pieux battus, on a profité d'en équiper 41 de sondes géothermique double U afin de les faire fonctionner en tant que source froide pour les pompes à chaleur. L'été, la production de froid pour le bâtiment est réalisée par échange direct sur la source froide. Dans les salles de classe, la distribution de chaleur et de froid s'effectue par rayonnement du plafond. Les installations techniques sont complétées par une ventilation douce avec récupération de chaleur. Des mesures effectuées (juin 2001 - mai 2002), il ressort que:

- le coefficient de performance (COP, sans comptabilisation des énergies auxiliaires) est supérieur à 4.5;
- le coefficient de performance annuel (COP A, avec comptabilisation de l'énergie auxiliaire de pompage dans la source froide) se situe aux alentours de 3.8;

- le rendement global annuel de l'installation de production de chaleur (incluant l'énergie des corps de chauffe électriques) est de 3.2;
- le fonctionnement estival de l'installation maintient un confort intérieur appréciable, tout en rechargeant la source froide;
- la fréquence d'enclenchement des compresseurs est faible, ce qui est favorable à leur longue durée de vie.

On peut constater une bonne correspondance entre les données du calcul MINERGIE et les résultats mesurés à degrés-jours équivalents: l'indice de MINERGIE se situe à 28 kWh/m².an (valeur-limite pour bâtiments administratifs : 40 kWh/m² par année). Ces résultats soulignent la bonne performance du système.

Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen [13]: Das Dock Midfield, mit allen technischen Anlagen, wurde im November 2002 fertig gestellt und dem Betreiber *unique* (Flughafen Zürich AG) übergeben. Die Energiepfahlanlage wurde ab Frühsommer 2002 provisorisch in Betrieb genommen. Das Umluft-Kältenetz konnte erfolgreich mit Free-Cooling über die Energiepfähle betrieben werden, wenn auch nur in Teillast. Seit Beginn der Heizperiode wird nun mit der WP Heizwärme erzeugt. Die Messungen dauern bis Ende 2005.

Graps, SG: Messungen Energiepfahlanlage Dividella AG [14]: Dieses Bauvorhaben besteht aus einer Erweiterung von einer Produktionshalle und Büros. Ca. 160 Energiepfähle mit einer aktiven Länge von je 24 m sollen über eine WP eine Wärmeleistung von rund 175 kW bzw. eine Kälteleistung (*free-cooling*) von ca. 70 kW erbringen. Ein innovativer Aspekt bei diesem Projekt ist die erstmalige Verwendung von gekoppelten Energiepfählen (d.h. 2 x 12 m lange Rammpfähle; neu kann nun die gesamte Pfahlänge energetisch genutzt werden). Mit diesem Projekt wurde im November 2002 begonnen.

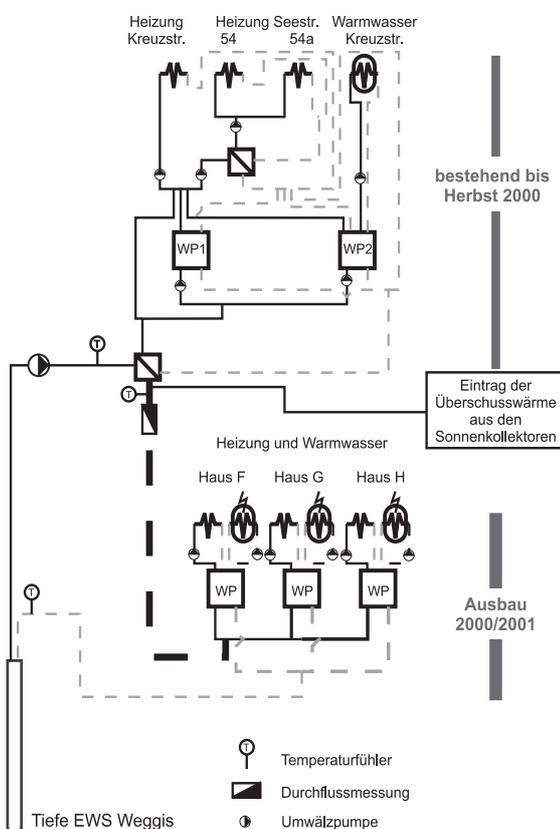
GRUNDWASSER -WÄRMENUTZUNG

Zweijährige Erfolgskontrolle (Messkampagne) der GW-WP Anlage „Pfarrhaus Bremgarten“ [15a] sowie **„Feuerwehrmagazin und Wohnungen Sisseln, (AG)“** [15b]: Für die Beheizung der katholischen Kirche in Bremgarten, inklusive Pfarrhaus und Pfarrhelferhaus, wurde die bestehende Ölheizung im Frühjahr 2002 zu 37% und für das Feuerwehrmagazin und die dazugehörigen Wohneinheiten (inklusive Brauchwasseraufbereitung) wurde die bestehende Ölheizung im Sommer 2002 zu 100% durch eine GW-WP

Anlage substituiert. Beide Anlagen laufen zufriedenstellend mit einer JAZ von ca. 4.

ÜBERTIEFE ERDWÄRMESONDEN

Tiefe Erdwärmesonde Weggis – Messkampagne zur Dokumentation der neuen Einflüsse beim Ausbau der Abnehmerleistung [16]: 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. In den Jahren 1995 bis 2000 lieferte sie jährlich eine Wärmemenge von rund 220 MWh für Direktheizung sowie als Quelle für Wärmepumpen zur Heizung und Warmwassererwärmung. Der Direktheizungsanteil erreichte Werte über 60 % der jährlichen Wärmemenge. Die Abnehmerleistung lag bei rund 100 kW. Dabei betrug die mittlere Quellentemperatur der Sonde 40.5°C und die mittlere Rückgabetemperatur 33.3°C (bei Minimalwerten von 20°C). Im Laufe des Betriebsjahres 2000/2001 wurde die Abnehmerstruktur um drei Mehrfamilienhäuser erweitert (siehe Fig.2) Dadurch hat sich die nominelle Abnehmerleistung praktisch verdoppelt.



Figur 2: Aktuelle Abnehmerstruktur der tiefen Erdwärmesonde Weggis

Die dem Sondenkreislauf entnommene Wärme hat sich im Betriebsjahr 2001/2002 ebenfalls 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)

Geothermie Contracting Solar One, Itingen, BL [17]: Die Siedlung Solar One in Itingen besteht aus Minergie-Häusern, deren Energieversorgung in Form von Heat Contracting erfolgt. Die Heizenergie wird durch Wärmeentzug, mittels Dublette plus Wärmepumpe, aus einem tiefen Aquifer mit einer Temperatur von ca. 22°C gewonnen. Zur Zeit werden 6 Häuser mit Wärme versorgt, weitere 6 Einheiten sind in Planung; die Kapazität der Dublettenanlage würde bei gleichem Baustandard sogar zur Versorgung von mehr als 50 Wohnungen ausreichen - bei einer maximalen Leistung der geothermischen Ressource von 250 kW.

Wärmegewinnung aus Thermalwasser (Schinznach Bad) [18]: Das 44°C heisse Wasser aus einer neuen Fassung wird nicht nur direkt als Badewasser genutzt, sondern mittels WP auch für die Beheizung der energieintensiven Bauten (Aquarena, Thermi und Treibhaus) verwendet:

- Die Arbeitszahl der WP liegt zur Zeit bei 4. Verbesserungen auf 4.5 sind möglich, wenn die Betriebsbedingungen für die Heizanlage weiter optimiert werden.
- Wasserqualität, Temperatur und Reinheit sind unverändert gut. Kein Thermalbrunnen zeigt Anzeichen von Erschöpfung.
- Das Projektziel 550 t Heizöl zu substituieren wird zu 77% erreicht (d.h. 387 t/a).

Exploitation du forage géothermique JAFE de Saillon [19a]: Die Beheizung des Schulhauses funktioniert problemlos, bei derjenigen des Schwimmbades gibt es mit dem Badewasser immer noch Probleme chemischer Natur. Leider ist im Herbst zusätzlich eine Tauchpumpe durch Kurzschluss ausgefallen und muss revidiert werden. Die Abschlussarbeiten mussten deshalb auf das Jahr 2003 verschoben werden.

Exploitation du nouveau forage géothermique P600 de Lavey les Bains [19b]: L'eau thermale fournie permet de couvrir la presque totalité des besoins en chauffage, production d'eau chaude sanitaire, ainsi qu'évidemment le réchauffage de l'ensemble de l'eau des piscines

du complexe thermal. Cela est possible grâce à une exploitation en cascade de l'eau thermale à différents niveaux de température, produits par un enchaînement hiérarchisé d'échangeurs de chaleur, sans utilisation d'aucune pompe à chaleur. Sur les 1'829 kW que représente le besoin moyen annuel en chaleur du centre thermal, seulement 100 kW sont apportés par une chaudière à mazout d'appoint (5.5%). Cette consommation d'énergie fossile est nécessaire d'une part pour faire face à des situations météorologiques exceptionnelles et d'autre part pour des raisons d'hygiène de l'eau des piscines (élimination de germes de type Legionella). Les rejets actuels du centre thermal, qui se chiffrent entre 600 et 1'100 l/min d'eau à une température comprise entre 30 et 34°C, pourraient être valorisés dans un projet de chauffage à distance à St. Maurice. En rajoutant un groupe de chaleur-force à la centrale de chauffage, la puissance maximale à distribuer atteindrait environ 4.7 MW ou l'équivalent de plus de 500 équivalent-logements.

NUTZUNG WARMER TUNNELWÄSSER

Potentiel géothermique et possibilités d'utilisation des eaux chaudes des tunnels de base d'Alptransit [20]: Les conditions géothermales régnaient à l'intérieur des massifs montagneux font que les eaux drainées par les tunnels implantés à grande profondeur sont susceptibles de drainer des eaux souterraines relativement chaudes. Ces eaux, captées au portail du tunnel, peuvent être utilisées comme source de chaleur pour le chauffage de bâtiments ou dans l'agriculture. A ce jour, plusieurs exemples de valorisation de cette énergie existent en Suisse. La chaleur véhiculée par les eaux souterraines des tunnels de base d'Alptransit, celui du Lötschberg et celui du St. Gotthard, actuellement en construction, recèlent un potentiel thermique considérable, en raison des massifs à températures élevées qu'ils traversent et des importantes venues d'eau attendues. Diverses réflexions ont été menées depuis plusieurs années, dans le but de déterminer les possibilités d'utilisation de cette énergie dans les régions proches de tunnels. Dans l'ensemble des quatre portails, il existe un réel intérêt pour la valorisation du potentiel géothermique des tunnels, au niveau des autorités communales et cantonales. De leur côté, les constructeurs des tunnels manifestent de même un intérêt marqué pour la reprise de cette chaleur par des tiers, vu l'obligation de limiter la température des eaux rejetées dans les rivières.

Statusbericht. Wärmenutzung warmer Tunnelwässer aus dem St. Gotthard und Lötschberg-Basistunnel [21a]: Die Aktivitäten und Be-

wertung der thermischen Tunnelwassernutzung Basistunnel Gotthard und Lötschberg sollen von zentraler Stelle und nach einheitlichen Massstäben erfolgen. Die Vorgehensstrategie sieht vor, in mehreren Phasen bis zu einer möglichen Realisierung vorzugehen. Der vorliegende Bericht zeigt die Ergebnisse der Bearbeitungsphase 1. Es werden darin die Grundlagen Wärmeangebot Tunnelwasser, Wärmebezüger-Gebiete und bauliche sowie terminliche Abhängigkeiten mit dem Bau der *AlpTransit* dargestellt. Der Baufortschritt der Basistunnel lässt auf eine mögliche Bergwassernutzung ab 2008-2010 (Gotthard), resp. 2004 (Lötschberg) schliessen. Aufgrund des positiven Wärmequellenangebots sollen in einem nächsten Schritt detailliert die Möglichkeiten der Wärmenutzung untersucht werden. Dadurch können mögliche Realisierungsvorbereitungen für die Bergwassernutzung rechtzeitig gestartet und Abhängigkeiten mit *AlpTransit* koordiniert werden (Abgang der Leitungen, Trasseführung etc.).

Machbarkeitsstudie. Tunnelwassernutzung für Heizzwecke, Lötschberg-Basistunnel (Portal Frutigen) [21b]: In dieser Studie werden die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für eine sinnvolle Nutzung der warmen Tunnelwässer in der Portalzone Frutigen abgeklärt. Besonderes Gewicht wird dabei auf neue und innovative Anwendungen dieser Wässer gelegt werden (z.B. Betrieb von Gewächshäusern (s. Titelblatt), Erlebnisbad, etc.). Die somit gewonnenen Informationen werden zukünftig wichtige Grundlagen für effektive Projektrealisierungen bilden.

Machbarkeitsstudie. Tunnelwassernutzung Lötschberg Süd [21c]: Aus dem NEAT Lötschberg-Basistunnel wird nach dessen Fertigstellung warmes Bergwasser ausfliessen. Heutige Schätzungen gehen von einer Schüttmenge von 80-180 l/s bei einer Temperatur von 20-25°C aus. Am Hauptportal Raron steht somit bei einer Abkühlung auf 10°C eine Wärmeleistung von 3.3-7.6 MW zur Verfügung.

Gewinnung geothermischer Energie aus dem Hauenstein Basistunnel [22]: Die Wärmepumpe ist 2002 gut gelaufen. Ein kurzer Ausfall war bedingt durch Luft im Ansaug der Tunnelwasserpumpe. Der Betriebsaufwand für den Tunnelwasserkreislauf ist noch relativ hoch. Die Störungen werden fast ausschliesslich in diesem Teilsystem verursacht. Die Verschmutzung des Tunnelwassers ist unterschiedlich. Teilweise werden Speisereste bis zum Grobfilter in der Heizzentrale geführt. Die Probleme mit dem Feinfilter sind noch nicht gelöst. Durch die Eisenanteile im Tunnel wird der Rückspülmechanismus beeinträchtigt. Der

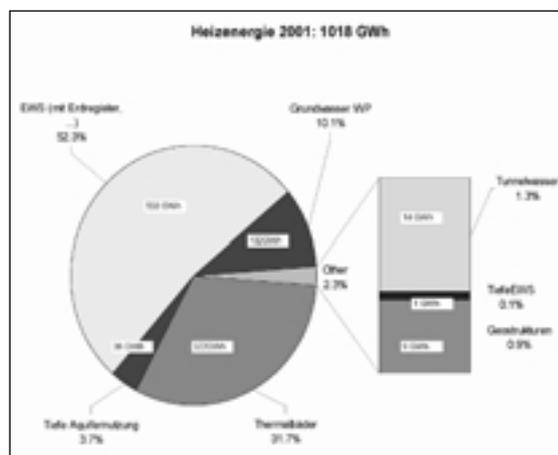
automatische Betrieb der Filterreinigung musste ausgesetzt und durch eine periodische manuelle Reinigung ersetzt werden. Seit Anfang Oktober werden zwei grössere Liegenschaft mit Wärme versorgt. Erste Auswertungen deuten auf erheblich längere Betriebszeiten der Wärmepumpe hin. Der Schlussbericht ist im Frühjahr 2003 fällig.

GEOTHERMISCHE KARTEN, POTENTIALE UND STATISTIKEN, GÜTESIEGEL

Geothermische Karte Tessin. Wärme aus Boden und Wasser – Kanton Tessin [23]: Der Schlussbericht erscheint im Frühjahr 2003. Es gab Verzögerungen wegen personeller Wechsel an der Spitze der Scuola universitaria della Svizzera italiana bzw. unerwarteter Probleme bei der Messung von thermischen Leitfähigkeiten an Gesteinsproben.

Evaluation du potentiel géothermique du Canton de Vaud [24]: **Le but du projet** est de permettre aux instances cantonales de connaître les potentialités existant dans les domaines concernés et d'établir un plan de valorisation à moyen et long terme. Le projet consiste en un travail d'évaluation préliminaire des potentialités existant sur le territoire du canton de Vaud dans trois domaines d'utilisation du potentiel calorifique de la terre, à savoir les géostructures énergétiques (pieux, parois moulées, etc.), les aquifères profonds, ainsi que la géothermie haute énergie.

Statistik geothermischer Nutzung in der Schweiz für das Jahr 2001 [25]: Ziel war die Erhebung der gesamten geothermischen Nutzungen in der Schweiz in den Jahren 2000 und 2001. Die Aufschlüsselung der Wärmeproduktion aus diesen Nutzungssystemen für das Jahr 2001 ist aus Figur 3 ersichtlich.



Figur 3: Diagramm mit Anteil der jeweiligen Nutzung im Jahr 2001

Gütesiegel für Planer von Geothermieanlagen, Geothermiepreis (Phase1, 2002) [26]: Monovalente Erdwärmesonden-Heizanlagen erfreuen sich heute bei neu gebauten EFH und kleinen MFH grosser Beliebtheit. Wegen der Einfachheit der Systeme können diese heute in der Regel „ab Stange“ gekauft werden. Klein-EWS-Anlagen werden heute oft über die Wärmepumpenverkäufer (z.B. Hersteller auf Publikumsmessen) direkt verkauft. Solche im Schweizer Mittelland erstellten Anlagen verlangen zwar eine gewisse Erfahrung der Installateure und Bohrfirmen, erfordern aber kein eigentliches geothermisches Engineering durch Spezialisten.

Grössere Erdwärmennutzungs-Anlagen (VDI 4640) wie EWS-Sondenfelder, Geostrukturen, Grundwasser und Nutzung von warmen Tunnelwässern sowie mittelgrosse Anlagen in höher gelegenen Gebieten der Schweiz, bivalente Anlagen, Heizen und Kühlen, saisonale Speicherung, evtl. Kopplung an solarthermische Anlagen erfordern jedoch gute Kenntnisse der im Untergrund ab-

laufenden Vorgänge. Hier ist professionelles Engineering durch zertifizierte Geothermie-Spezialisten unerlässlich. Hier setzt das vorliegende Projekt an. Für komplexe geothermische Anlagen werden im Rahmen dieses Projektes:

- Planer zertifiziert, die die Vorgaben als *Geothermie – Experten* erfüllen;
- Empfehlungen / Richtlinien für die Nutzung der Erdwärme erstellt (Heizen/Kühlen, Sondenfelder, Geostrukturen, saisonale Speicherung);
- das *Gütesiegel Geothermieanlagen* (Arbeitstitel) für korrekt ausgelegten Anlagen (unterirdischer Teil) verliehen (Verleihung an Planungsbüro; Erstellen Statistik Gütesiegel-Geothermieanlagen);
- ab 2003 jährlich ein Geothermie-Preis an besonders innovative oder besonders interessante Geothermieanlagen verliehen.

Dabei wird vorausgesetzt, dass für jede komplexe EWS-Anlage der geothermische Responsetest durchgeführt wird.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

FORSCHUNG

Als grosser Fortschritt in der DHM-Forschung sind die nun vorliegenden Resultate der in 2002 erfolgreich durchgeführten geothermischen Tiefbohrung Otterbach 2 in Basel zu betrachten. 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 aus dem Ausland versorgt werden. Im Jahr 2003 gilt es nun, Finanzquellen für das Abteufen einer tiefen Produktionsbohrung (ca. 5'000 m) zu finden.

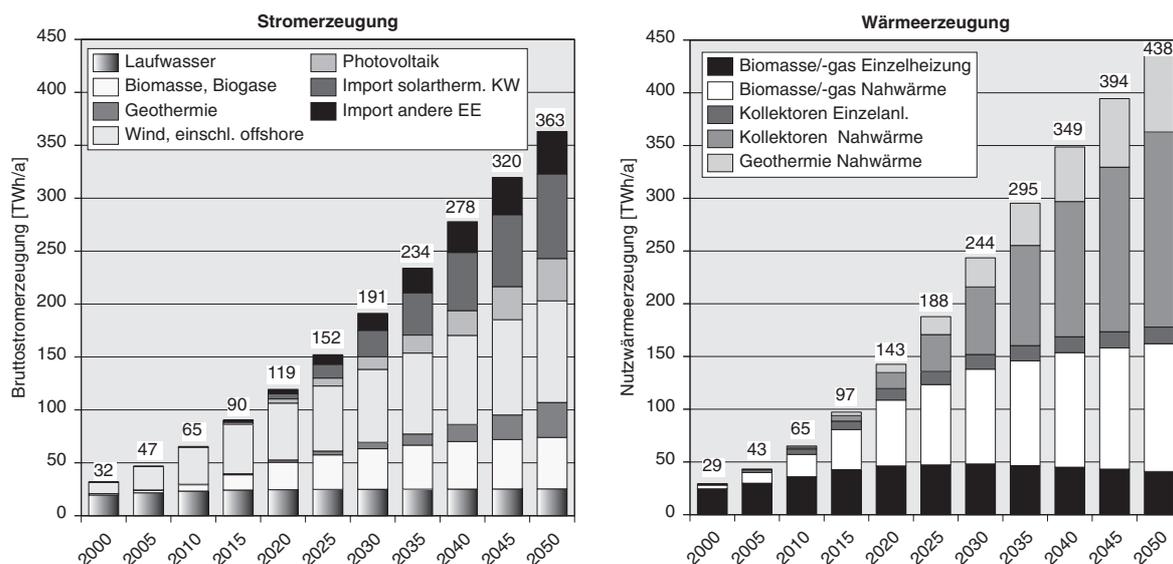
Der grösste Forschungsbedarf besteht bei der kombinierten Strom- und Wärmegewinnung. In dieser Technologie steckt ein bedeutendes energetisches Potenzial. Es existieren nationale und internationale Forschungsprojekte (IEA, EU-Forschungsprogramm) mit schweizerischer Beteiligung, welche in diesem Gebiet tätig sind. In der Schweiz konnte dank dieser Zusammenarbeit und dank des Projekts *Deep-Heat-Mining* Know-how aufgebaut werden, welches international gefragt ist. Für die schweizerischen Hochschulen und für die Maschinenbau- und Elektroindustrie bietet sich hier eine grosse Chance.

Aus all diesen Gründen wird das Schwergewicht der Fördermittel im Forschungsbereich auf die

Entwicklung der Hot-Dry-Rock Technologie gelegt. Das Programm *Geothermie* unterstützt die dazu notwendigen wissenschaftlichen Arbeiten national und international. Dazu gehören

- das Langzeitverhalten und die Nachhaltigkeit der Energieproduktion aus HDR-Anlagen;
- die hydraulische, chemische und felsmechanische Charakterisierung des Reservoirs;
- die Erarbeitung einer detaillierten Potenzialkarte für HDR-Anlagen;
- Untersuchungen zu Risiken von HDR-Anlagen (z.B. induzierte Seismizität);
- Arbeiten für die Entwicklung geeigneter Prozesse für Binäranlagen;
- Untersuchungen zu den Möglichkeiten von Hybrid-Prozessen: Die aus der Erde gewonnene Energie wird mit einer Feuerung ergänzt. Diese Feuerung kann mit erneuerbaren Energieträgern betrieben werden und erlaubt die Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades.

Nebst dem Projekt in Basel, welches finanziell u.a. vom Kanton Basel-Stadt, IWB und EBL unterstützt wird, haben in Genf - unter finanzieller Beteiligung von Kanton und Stadt Genf - die Projektierungsarbeiten für ein HDR-Kraftwerk begonnen. Der Kanton Waadt klärt die Möglichkeiten eines solchen Kraftwerkes für die Stadt Lausanne ab,



Figur 4: Prognose Deutschland: Wärme und Stromproduktion aus erneuerbaren Energien

ähnliches ist für die Stadt Zürich geplant. Ziel des Programms *Geothermie* ist die Realisierung mindestens eines geothermischen Kraftwerks mit Strom- und Wärmeproduktion in der Schweiz bis 2010.

Längerfristig hat die Geothermie das Potenzial, einen bedeutenden Teil der schweizerischen Energieversorgung zu übernehmen. In diesem Sinne sind auch die jüngst erstellte Langfrist-Prognosen (siehe Fig. 4) für die Nutzung der Geothermie in Deutschland [27] interessant:

Die Forschungsziele 2002 in der un tiefen Geothermie (EWS, Geostrukturen, geothermischer Response Test, etc.) konnten voll erreicht werden. Ergänzende Arbeiten werden 2003 weitergeführt. Damit die Anwendung der Geothermie flächendeckend erfolgen kann, sind für alle Nutzungstechnologien Qualitätssicherungs-Instrumente notwendig. Diese müssen entwickelt, überprüft und bei den massgebenden Stellen eingeführt werden.

P+D PROJEKTE

Die technischen Voraussetzungen zur Nutzung der geothermischen Energie mit Hilfe von Erdwärmesonden und -feldern, mit Energiepfählen oder zur direkten Nutzung sind zu einem gros-

sen Teil vorhanden. Trotzdem werden sie (noch) nicht breit genutzt. Die Einsatzmöglichkeiten der Geothermie für Grossanlagen müssen darum mit Demonstrationsanlagen besser bekannt gemacht und ihre energetischen und wirtschaftlichen Kennzahlen publiziert werden.

Bei den P+D-Projekten wird deshalb, wie bereits im vergangenen Jahr, das Schwergewicht auf **Messkampagnen beim Betrieb von geothermischen Grossanlagen** gelegt. Das Konzept dabei ist, in verschiedenen Regionen der Schweiz den einwandfreien Betrieb von geothermischen Vorzeiganlagen zu beweisen und damit eine Multiplikation solcher Anlagen zu erreichen (die entsprechenden Informationen und Vermarktungen erfolgen hierbei durch das Programm EnergieSchweiz). Im Kanton St. Gallen sowie im Aargau konnten erste Erfolge nachgewiesen werden.

Basierend auf den ermutigenden geothermischen Ergebnissen aus den beiden *AlpTransit* Projekten, stehen Beratungs- und Informationsarbeiten vis-à-vis der kantonalen Behörde der vier betroffenen Kantone im Zentrum der kommenden Aktivitäten. Einen weiteren Aspekt stellt die Identifikation von zukünftigen Nutzungsmöglichkeiten von den warmen Drainagewässern aus den Tunnelröhren dar (z.B. für Gewächshäuser, Erlebnisbäder, etc., die auch im Sommer Wärmeenergie benötigen).

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

- [1] M.O. Häring, (haering@geothermal.ch), ARBEITSGEMEINSCHAFT DHM, Basel: **a) Deep Heat Mining; Entwicklung der Hot-Dry-Rock/Hot-Wet-Rock Technologie in der Schweiz; 2002** (JB) ♦ **b) Deep Heat Mining; Teilprojekt „Monitoring Station“** (JB) ♦ **c) Deep Heat Mining; Entwicklung der Hot-Dry-Rock/Hot-Wet-Rock Technologie in der Schweiz; 2002. Investigations relatives à l'implantation d'une centrale DHM à Genève** (JB)
- [2] R.J. Hopkirk, (roberthopkirk@compuserve.com), ARBEITSGEMEINSCHAFT GIA, Männedorf: **Teilnahme am Geothermal Implementing Agreement der IEA (Annex III, Hot Dry Rock, Subtask C, Fortsetzung 2002)** (JB)
- [3] D. Pahud, (daniel.pahud@dct.supsi.ch), ARBEITSGEMEINSCHAFT, Canobbio: **Langzeiteffekt von Mehrfach- Erdwärmesonden (EWS)** (SB) ENET 220005
- [4] H. Graf (h.graf@mbn.ch), MATOUSEK, BAUMANN & NIGGLI AG, Baden: **Arteserkarte der Schweiz – Teilgebiet Basel - Luzern** (JB)
- [5] L. Lalui (lyesse.laloui@epfl.ch), EPFL – ENAC, Lausanne: **Finalisation du module de l'EPFL pour les tests de réponse.** (SB)
- [6] W.J. Eugster (wjeugster@swissonline.ch), POLYDYNAMICS ENGINEERING ZÜRICH, Zürich: **Workshop zur Qualitätssicherung von „geothermischen Response Tests“** (SB) ENET 220180

Liste der P+D-Projekte

- [7] D. Pahud, (daniel.pahud@dct.supsi.ch), LEE – SUPSI, Canobbio: **Misure di un impianto di riscaldamento con sonda geotermica a Lugano (TI)** (JB)
- [8] Ch. Kapp, (ch.kapp@nek.ch), NEK UMWELTECHNIK AG, Zürich: **a) Demonstrationsprojekt zum Effizienzvergleich zwischen konventioneller (tiefer) EWS und der Neuentwicklung „Regenschirm- Erdwärmesonde“** (SB) ENET 220158 ♦ **b) Demonstrationsprojekt zur Energieeffizienz einer grossen Wohnüberbauung („Unteres Hompeli“, SG) im Minergie- Standard** (JB)
- [9] 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)
- [10] P. Joliquin, (patric.joliquin@epfl.ch), GEOLEO – EPFL; Lausanne: **Exploitation de la chaleur terrestre par des géostructures énergétiques. Méthodologie de détermination des zones potentielles** (SB) ENET 220163
- [11] Ch. Kapp, (ch.kapp@nek.ch), NEK UMWELTECHNIK AG, Zürich: **Regionalgefängnis Rheintal, Altstätten (SG):Beheizung und Klimatisierung mittels Energiepfählen, gekoppelt mit Erdwärmesonden** (JB)
- [12] M. Anstett, (valais@tecnoservice.ch), TECNOSERVICE ENGINEERING S.A, Martigny: **Pieux énergétique avec distribution de chaleur et de froid intégrée dans la structure : Centre Scolaire Ver-l'Eglise / Fully** (SB) ENET 220162
- [13] M. Hubbuch, (m.hubbuch@hswzfh.ch), FH Wädenswil, Canobbio: **Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen** (JB)

- [14] M. Morath, (morath.marcel@lippuner-emt.com), ING. BÜRO LIPPUNER AG, Grabs: **Messungen Energiepfahlanlage Dividella AG** (JB)
- [15] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, Aarau: **a) Zweijährige Erfolgskontrolle (Messcampagne) der GW- WP Anlage „Pfarrhaus Bremgarten“** (JB) ♦ **b) Zweijährige Erfolgskontrolle (Messcampagne) der GW- WP Anlage „Feuerwehrmagazin und Wohnungen Sisseln, (AG)“** (JB)
- [16] W.J. Eugster (wjeugster@swissonline.ch), POLYDYNAMICS ENGINEERING ZÜRICH, Zürich: **Tiefe Erdwärmesonde Weggis – Messkampagne zur Dokumentation der neuen Einflüsse beim Ausbau der Abnehmerleistung** (SB) ENET 220178
- [17] Ch. H. Häring, (info@haring.ch), HÄRING AG, INNOVATIVE BAUSYSTEME, Pratteln: **Geothermie Contracting Solar One, Itingen, BL** (SB) 210183
- [18] S. Flury, (ing.buero@sytek.ch), SYTEK AG, INGENIEURBÜRO FÜR GEBÄUDETECHNIK, Binnigen: **Wärmegewinnung aus Thermalwasser (Schinz nach Bad)** (SB) ENET 220121
- [19] G. Bianchetti, (gabianc@vtx.ch), HYDROGEOLOGIE, GEOTHERMIE, GEOTECHNIQUE, Sion: **a) Exploitation du forage géothermique JAFE de Saillon** (SB) ♦ **b) Exploitation du nouveau forage géothermique P600 de Lavey-les Bains** (JB)
- [20] J. Wilhelm, (jules.wilhelm@bluewin.ch), INGENIEUR-CONSEIL, Pully: **Potentiel géothermique et possibilités d'utilisation des eaux des tunnels de base d'Alptransit.** (SB)
- [21] G. Oppermann (gerhard.oppermann@gruneko.ch) GRUNEKO AG, Basel: **a) Statusbericht. Wärmenutzung warmer Tunnelwässer aus dem St. Gotthard und Lötschberg - Basistunnel** (SB) ENET 220157 ♦ **b) Machbarkeitsstudie. Tunnelwassernutzung für Heizzwecke, Lötschberg- Basistunnel (Portal Frutigen)** (SB) ♦ **c) Machbarkeitsstudie. Tunnelwassernutzung Lötschberg Süd** (JB)
- [22] D. Zürcher, (daniel.zuercher@durena.ch), DURENA AG, Lenzburg: **Gewinnung geothermischer Energie aus dem Hauenstein Basistunnel** (JB)
- [23] M. Thüring, (thuring@ist.supsi.ch), INSTITUTO SCIENZE DELLA TERRA – SUPSI, Canobbio: **Geothermische Karte Tessin. Wärme aus Boden und Wasser – Kanton Tessin** (JB)
- [24] J. Wilhelm, (jules.wilhelm@bluewin.ch), INGENIEUR-CONSEIL, Pully: **Evaluation du potentiel géothermique du Canton de Vaud** (JB)
- [25] Th. Kohl, (kohl@geowatt.ch), Zürich: **Statistik geothermischer Nutzung in der Schweiz für das Jahr 2001** (SB)
- [26] W.J. Eugster (wjeugster@swissonline.ch), POLYDYNAMICS ENGINEERING ZÜRICH, Zürich: **Gütesiegel für Planer von Geothermieanlagen, Geothermiepreis (Phase1, 2002)** (JB)

Referenzen

- [27] **Jahrbuch Erneuerbare Energien 2001**, Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, Raabebeul: Bieberstein, 2001. ISBN 3-927656-15-1 mit CD-ROM, Seite I-203.

WIND

Überblicksbericht zum P+D-Programm 2002

Robert Horbaty

robert.horbaty@enco-gmbh.ch



800 kW-Windkraftanlage auf dem Gütsch oberhalb Andermatt

Bei dieser Anlage des Elektrizitätswerk Urseren handelt es sich um die weltweit höchstgelegene Installation dieser Leistungsklasse (2'300 m.ü.M.)

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

WINDENERGIE-MARKT

Die spezifischen Kosten von grösseren Windkraftanlagen betragen **ca. 2000 Fr. / kWp** wodurch auch in der Schweiz an gut bewindeten Standorten **Stromgestehungskosten von unter 20 Rp./kWh** resultieren. Die Stromgestehungskosten der neusten im Jahre 2001 installierten 850 kW-Windkraftanlagen belaufen sich laut Aussage der Betreibergesellschaft Juvent SA auf rund **12 Rp./kWh**.

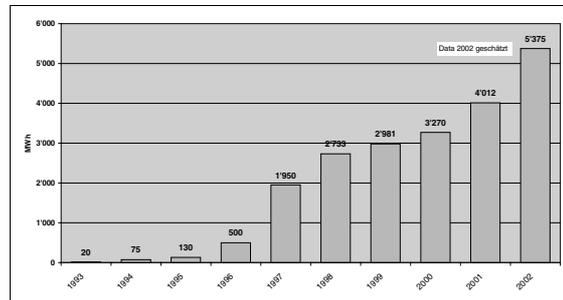
Provisorische Zahlen für 2002 zeigen, dass die 30'000 MW-Grenze an weltweit installierter Windenergiekapazität überschritten wird. *Der Anteil des potenziellen Jahresenergieertrags aus Windkraftanlagen am Nettostromverbrauch in Deutschland stieg von 3 Prozent in 2001 auf 4,7 Prozent in 2002* [21].

Der Markt wächst nach wie vor um 30% pro Jahr – eine Herausforderung, der sich auch Schweizer Firmen wie Bartholdi AG (Generatoren), ids AG und Technocon (Inverter), Meteolabor (Anemometer) Blatec (Rotorblätter) gestellt haben. Die Firma Aventa AG produziert kleine Windkraftanlagen im Bereich von 6 kW, wovon 9 Anlagen in Schwachwindgebieten installiert wurden.

Die 19 in der Schweiz installierten Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von 5.36 MWp erzeugten im Berichtsjahr 5'375 MWh Elektrizität (Fig. 1). Die **Zunahme** betrug im vergangenen Jahr **rund 20%**.

FORSCHUNGS- UND P+D-ZIELE

Das **Konzept der Energieforschung des Bundes 2000 – 2003** [20] hält kurz- und mittelfristig folgende Schwerpunkte für den Bereich Windenergie fest:



Figur 1: Entwicklung der Elektrizitätsproduktion aus Windenergie in der Schweiz

- **Standortabklärungen und Projektentwicklungen** im gebirgigen Terrain unter klimatisch schwierigen Voraussetzungen
- **Förderung von Einzelprojekten** für Nischenprodukte
- Klärung von windspezifischen **Akzeptanz-Problemen**.

Zudem sollen vor allem auch Pilot- und Demonstrationsanlagen gefördert werden.

Die Aktivitäten und Projekte des Programms *Wind* sind dahingehend ausgerichtet, an den evaluierten Standorten kurz- und mittelfristig Windkraftanlagen zu installieren mit dem Ziel, einerseits entsprechende **Betriebserfahrungen** zu sammeln, andererseits aber auch einen wesentlichen Beitrag zur **Zielerfüllung von EnergieSchweiz im Bereich der erneuerbaren Energie** zu leisten. Danach sollen jährlich 50 – 100 GWh Windstrom bis ins Jahr 2010 erzeugt werden.

Das Programm *Wind* konzentrierte sich im Jahr 2002 insbesondere auf die Erarbeitung von **Planungshilfen**, auf die Unterstützung von **Standortabklärungen** sowie Installation und Evaluation von **Pilot- und Demonstrationsanlagen**.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

PLANUNGSHILFEN

Das Programm Wind hat in den vergangenen Jahren mehrere Unterlagen, Studien und Planungshilfen erarbeitet, um entsprechende Projekte mit einer hohen Erfolgchance realisieren zu können, so z.B. **Windkraft und Landschaftsschutz** [22] und **Planung von Windenergieanlagen** [23].

Basierend auf diesen Publikationen wurden im Berichtsjahr **weitere Instrumente** erarbeitet und den interessierten Planern zur Verfügung gestellt:

Windenergie und Raumplanung [1]: Die Errichtung von Windparks bedingt eine entsprechende Grundlage in der kantonalen Richtplanung und

in den kommunalen Nutzungsplanungen. Zur Zeit bestehen noch wenige Beispiele für solche Grundlagen, da Kantone und Gemeinden bis anhin selten mit dieser Frage konfrontiert wurden. Dies wird sich in der nächsten Zeit ändern. Das Bundesamt für Energie hat sich deshalb entschlossen, eine entsprechende Arbeitshilfe erstellen zu lassen. Grundlagen dazu sind Untersuchungen zu den vorhandenen Windpotenzialen in der Schweiz und zur Problematik Windkraft und Landschaftsschutz.

In einem ersten Teil werden die zurzeit üblichen Windanlagen, die unterschiedlichen Errichtungsarten und das **Verhältnis zur Richt- und Nutzungsplanung** (Fig.2) aufgezeigt. Diese Angaben werden durch Hinweise auf frühere Untersuchungen ergänzt. Ein zweiter Teil zeigt auf, welche Fragen in den kantonalen Richtplänen zu behandeln sind. Diese Pläne können sich auf Grundlagen des Bundes und auf kantonale Konzepte abstützen.

Verschiedene Kantone delegieren Aufgaben an die Regionalplanungen. Diese können ebenfalls zur Förderung der Windenergie beigezogen werden. Eine wichtige Rolle spielen die Gemeinden. Sie müssen in der Nutzungsplanung die Voraussetzungen für Windparks schaffen und sind zusammen mit den Kantonen auch Baubewilligungsbehörde. Der **Inhalt von Nutzungsplänen** für Anlagen und die nötigen Vorschriften werden detailliert dargestellt. Zwei Ablaufschemen zeigen, wie die Planung der Anlagen mit der Erarbeitung der bau- und planungsrechtlichen Instrumente koordiniert werden kann.

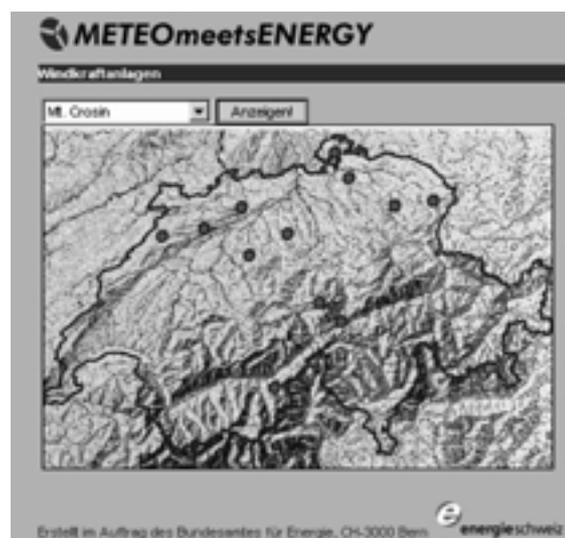
Im Anhang werden **Beispiele aus Richtplänen** dargestellt und es wird auf Literatur und weiterführende Adressen verwiesen. Die Arbeitshilfe wendet sich sowohl an die Verwaltungen aller Stufen, die mit der Planung, Beurteilung und **Bewilligung von Windanlagen** befasst sind, als auch an Personen, die solche Anlagen realisieren wollen.



Figur 2: Darstellung der Zusammenhänge zwischen Richtplanung, Nutzungsplanung und Baubewilligung

Winddatenbank auf dem Internet [2a]: Folgende umfassenden Informationen sind unter dem Titel *Windkarten Schweiz* auf der Website der schweizerischen Windenergievereinigung *Suisse Eole* erhältlich und werden laufend aktualisiert:

- **Windmessstandorte** - Stationsübersicht von Meteo Schweiz
- **Mittlere Windgeschwindigkeiten** dieser Messstandorte für die Jahre 1983-1997
- **Monatsmittelwerte** der Windgeschwindigkeit ab 1998
- Resultate der **temporären Messungen** von geförderten Windenergieprojekten
- **Standortbeschriebe** (Fig.3) von Windkraftanlagen und **Windprognosen** der nächsten Tage (Besichtigungen!)
- Publikation der **Potentialkarten** (Windgeschwindigkeiten und Aspekte des Landschaftsschutzes)
- **V3-Toolbox**: Programm zur Berechnung der WEIBULL-Parameter A,k aus einer gemessenen Häufigkeitsverteilung. Format Microsoft Excel 97.
- **WINFO - Geo-Informationssystem zur Windenergie** Detaillierte Darstellung der für die Nutzung Windenergie relevanten geographischen Aspekte, inkl. Landschaftsschutzgebiete



Figur 3: Auf der Webseite von Suisse Eole [24] können die Standorte von Windkraftanlagen besucht werden.

Das Ziel des Projekts **Risk Management Windenergie Schweiz** [3] war, die Hindernisse zur **erfolgreichen Umsetzung der Ziele des Programms Wind** zu analysieren und Massnahmen

dagegen zu definieren, die in die **Jahresplanung 2003** des Programms *Wind* und der *Suisse Eole* aufgenommen werden sollen.

Diese Analyse kommt zusammenfassend zum Schluss:

- Es ist möglich, die bestehenden, doch beträchtlichen Risiken der Strategie Windenergie Schweiz zu reduzieren. Die Möglichkeiten liegen vor allem im **Bereich der Kommunikation** gegenüber der Öffentlichkeit, der Elektrizitätsversorger und der Investoren.
- Das **Kernproblem** der Windenergienutzung in der Schweiz ist und bleibt der unbestrittene Einfluss von Windenergieanlagen auf das **Landschaftsbild**. Die Reaktionen der Bevölkerung reichen von Begeisterung (2001: 40'000 Besucher auf dem Mont Crosin) bis zur fundamentalen Ablehnung (z.B. Stiftung für Landschaftsschutz). Wichtige Ziele für die weitere Arbeit müssen demnach sein:
 - Behandlung der Differenzen mit den Gegnern im Rahmen des **nationalen Windenergiekonzeptes**.
 - Bildung eines **Gegengewichts** zur Kommunikation der Gegner.
 - Grundlagen betreffend Einfluss und **Akzeptanz** von realisierten Windenergieanlagen erarbeiten.
 - Hand bieten für flexible **technologische Lösungen**.

STANDORTABKLÄRUNGEN

Das Programm *Wind* unterstützt – als Vorbereitung für P+D-Projekte - Standortabklärungen zur Installation von Windkraftanlagen. Mit diesen Studien wird die **Machbarkeit von Windkraftprojekten** fundiert abgeklärt. Die Kriterien beinhalten:

- Windressourcen (Windmessungen, Hochrechnungen auf langjährige Verhältnisse)
- Erschliessung (Elektrizität, Zuwegung)
- Umweltverträglichkeit
- Wirtschaftlichkeit (möglicher Energieertrag und Finanzierung)
- Raumplanerische Rahmenbedingungen

Im Jahre 2002 wurden folgende Projekte mit Schlussbericht abgeschlossen: **Mettlimoos-Obwyden** [4], **Grimsepass** [5a], **Gottardpass** [5b], **Igelrain** [6], **St. Moritz** [7] **3 Windenergie-Standorte Laax** [8], **Kanton Graubünden**

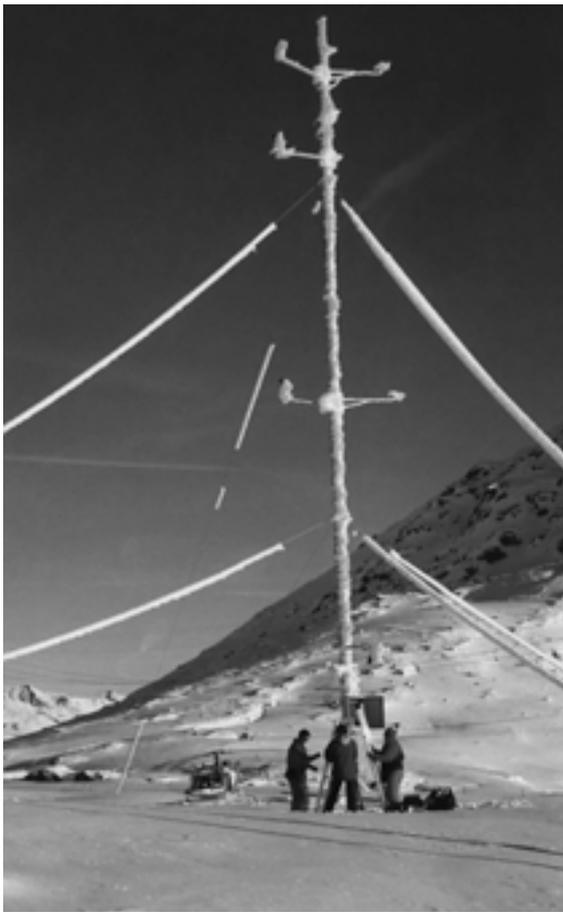
[9a], **La Racine** [10]. Folgende Projekte sind noch in Bearbeitung: **Windpark Sainte-Croix** [11], **Arosler Weisshorn** [12], **Linthebene** [13] und **Illnau-Effretikon** [14]. Das Projekt **Saint-Brais** [15] wurde abgebrochen und wird ev. im Jahr 2003 mit neuer Projektträgerschaft wieder aufgenommen.

Projekt **Abklärungen für ein Windenergieprojekt auf dem Gotthardpass** [5b]: Stellvertretend für obige Projekte wird hier das Projekt auf dem Gotthardpass genauer erläutert. Ziel war es, fundiert abzuklären, inwiefern sich der vorgesehene Standort auf dem Gotthardpass zur Errichtung von Windkraftanlagen eignet. Dazu wurden umfangreiche, **standortbezogene Windmessungen** und eine **Modellierung des Windes** durchgeführt sowie möglichst viele der notwendigen Rahmenparameter im Zusammenhang mit der möglichen Errichtung von Windenergieanlagen auf dem Gotthardpass geklärt.

Die Windmessungen an einem 17 m hohen Messmast (Fig. 4 und 5), der im Juli 2001 auf 30 m aufgestockt worden ist, wurden im Dezember 2000 aufgenommen. Zudem wurden an mehreren Standorten mit leicht verschiebbaren 10 m-Masten die Windverhältnisse erfasst, um genauere Angaben zu lokalen Unterschieden der Windverhältnisse zu erhalten. Die Messungen auf einem dieser 10 m-Masten laufen nach wie vor.

Die durchgeführten Untersuchungen und Abklärungen haben gezeigt, dass die Windverhältnisse auf dem Gotthardpass grundsätzlich ausreichen, um ein Windenergieprojekt umzusetzen. Auf einer Höhe von 50 m über Boden kann mit einer langjährigen, mittleren **Windgeschwindigkeit von 6.2 - 6.3 m/sec gerechnet werden**. Das Windmodell zeigt, dass auf dem gesamten für die Errichtung von Windenergieanlagen vorgesehenen Gebiet ein ähnlich grosses Windpotential vorhanden ist. Aufgrund der ermutigenden Windverhältnisse wurden zudem **Ingenieur- und Entwicklungsarbeiten** im Zusammenhang mit der Planung und Realisierung von Windkraftanlagen durchgeführt. Zum heutigen Zeitpunkt ist vorgesehen, ca. 7 Anlagen der Megawattklasse zu errichten, so dass das umzusetzende Projekt eine Grösse von **rund 9 MW** erreichen dürfte. Die Abklärungen mit den Behörden sowie mit einem interessierten Energieversorgungsunternehmen zeigen zudem, dass Interesse an diesem Projekt besteht. Der generierte Strom könnte relativ nahe in bestehende Leitungen eingespiessen werden, **ein Verkauf des Stromes zu den aktuellen, marktüblichen Preisen scheint möglich**.

Der im Zusammenhang mit dem durch das Bundesamt für Energie erteilte Auftrag ist mit der



Figuren 4 und 5 Bei tiefen Temperaturen lagern sich an Messmasten und Abspannungskabeln Eis und Schnee ab, was zu grossen Lasten und grösserer Angriffsflächen bei Böen führt. Bilder von der Messkampagne auf dem Gottardpass (2'100m.ü.M.) durch NEK Umwelttechnik.

Ablieferung dieses Schlussberichtes beendet. Im Sinne einer ersten Realisierungsphase werden projektspezifische Abklärungen unter dem Projekttitel **Projektrelevante Studien und**

Abklärungen im Zusammenhang mit einem Windenergieprojekt auf dem Gotthardpass [5c] vorgenommen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Leichtwindanlage AVENTA AV-7 [16]: Die Firma Aventa AG in Winterthur produziert eine 6.4-kW-Windkraftanlage, welche mit ihrem, für diese Leistung stark überdimensionierten Rotor (12 m Ø) auch für Standorte mit kleineren Windgeschwindigkeiten – bei entsprechend hohen Stromgestehungskosten – geeignet ist. Diese Anlage wurde im Rahmen des Projektes **Standort-abklärungen und Messprojekt Leichtwindanlage** [9b] detailliert ausgemessen (Fig.6).

Rechtsstehende Tabelle stellt den mit dieser Leistungskennlinie und den heutigen Anlagenkosten möglichen Energieertrag und die entsprechenden

Stromgestehungskosten bei unterschiedlichen Windverhältnissen dar:

vm (m/s)	Energieertrag ¹⁾ (kWh/a)	Energiekosten (Rp./kWh)
2.5	8'430	135
3.0	12'450	91
3.5	16'370	69
4.0	19'890	57
4.5	22'930	49

¹⁾ normiert auf ISO Standardatmosphäre mit einem k-Faktor der Weibull-Verteilung von 1.5

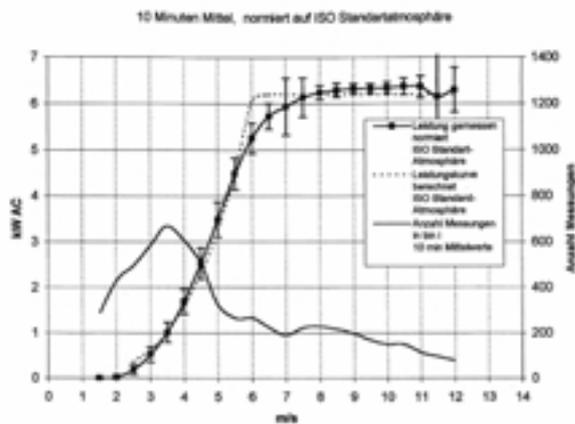


Fig. 6 Der Vergleich der berechneten und der gemessenen Leistungskennlinie der 6.4-kW-Anlage der Firma Aventa am Standort in Brütten zeigt eine schöne Übereinstimmung (Grafik: Aventa AG)

Um vertiefte Erfahrungen mit diesem Anlagentyp sammeln zu können wurde zwei weitere P+D Projekte unterstützt: **Erstellen einer Leichtwindanlage auf dem Siloturm der Landi Marthalen** [17] und **Leichtwindanlage Rüttenen** [18]. Beide Projekte sind noch nicht abgeschlossen.

850-kW-Windkraftanlage Gütsch [19]: Das EW-Ursern hat im Sommer 2002 eine 800 kW-Windkraftanlage auf dem Gütsch oberhalb Andermatt installiert. Erste Erfahrungen mit diesem auch vom Kanton Uri unterstützten Projekt zeigen, dass für die Nutzung der Windenergie auch im alpinen Raum durchaus ein Potential vorhanden ist:

- **Problemloser** Transport und Montage der Anlage auf 2'300 m.ü.M. (Fig.7).
- **Grosse Akzeptanz** bei der Bevölkerung und den Skitouristen
- Jedoch **schwierige und langwierige Inbetriebnahme** der Anlage aufgrund der Anlagenkomponenten verschiedener Hersteller.

Es handelt sich dabei nicht nur um die am höchsten gelegene Windkraftanlage weltweit, sondern auch um ein wegweisendes Anlagekonzept. Die Lagerwey-Maschine, welche durch die Firma

ABB Energie Services Schweiz geliefert wurde, beinhaltet folgende **innovative Elemente zur Nutzung der Windenergie** im Gebirge:

- **Wartungsarmer Permanent-Magnet Generator** der Firma *Bartholdi* in Koblenz, zur Reduktion des Gewichtes
- **Getriebeloser Triebstrang** mit variabler Drehzahl, zur optimalen Ausnutzung der turbulenten Winde
- **Rotorblattheizung**, zur Reduktion der Vereisungsgefahr
- **Stromumformer** der Zürcher Firma *Technocon*, zur Einspeisung der produzierten Elektrizität ohne Spannungsschwankungen

Die Endmontage dieser Anlage fand am 21. Juni 2002 statt. Bei der nun anstehenden Betriebsoptimierungsphase und **Erfolgskontrolle** wird sich weisen, inwieweit die in diese Anlage gesteckten Erwartungen insbesondere betreffend Energieertrag erfüllt werden können.

Im Rahmen der konkreten Standortabklärungen wurden **Zusatzmessungen am Gütsch** [2b]. durchgeführt. U.a. wurden mit einem Sodar-Messgerät Winddaten bis auf eine Höhe von 100m ermittelt.

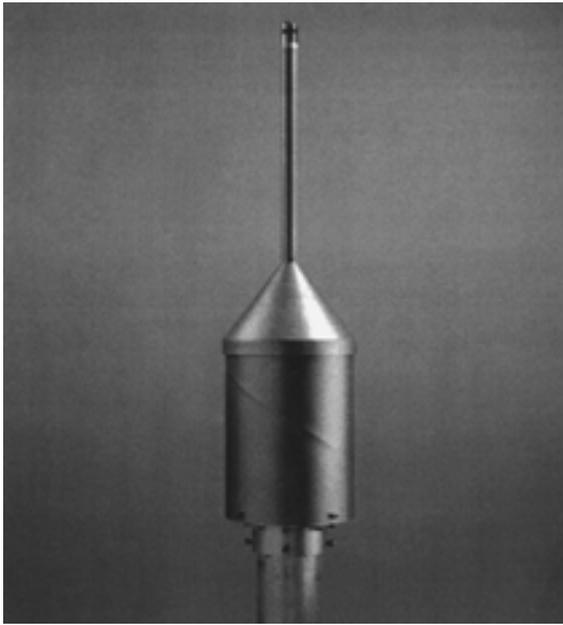


Figur 7 Transport des Mastunterteils auf der Bergstrasse zum Gütsch (Foto: EW Ursern)

Nationale Zusammenarbeit

Als konkretes Ergebnis aus dem Gütsch-Vorhaben entstand im Rahmen des Energieforschungsprogramms *Elektrizität* ein Entwicklungsprojekt für einen **Umrichter der Leistungsklasse 1.5 MW** mit der Firma Technocon.

Auf Initiative des Programms *Wind* wurde im Rahmen eines **KTI-Projekts** durch die Firma Meteorlabor, der MeteSchweiz und der ETH Zürich ein **vereisungssicheres Anemometer NOWA** [27] entwickelt, welches auf der Basis eines **Heizdrahtes** funktioniert.



Figur 8 Heizdraht- Anemometer (Foto : Meteolabor)

Die **Suisse Eole** [24] führt alle Aktivitäten zur indirekten Förderung der Windenergienutzung

in der Schweiz durch – in Zusammenarbeit mit kantonalen Energiefachstellen, Energieversorgern und den Planern. Da die Geschäftsführung dieser Organisation und die Programmleitung *Wind* in Personalunion geführt werden, ist eine optimale Abstimmung sichergestellt. *Suisse Eole* ist auch im Vorstand der **Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz (AEE)** [25] und im **Verein für umweltgerechte Elektrizität (VUE)** [26] vertreten und nimmt dort die Angelegenheiten v.a. der nicht gebäudegebundenen erneuerbaren Energien, wie Wind, Kleinwasserkraftwerke, etc. wahr.

Vor allem aus Kreisen des Landschaftsschutz bestehen Befürchtungen, dass mit der bisherigen Praxis, die sich das Aufzeigen möglicher Potentiale beschränkt, **Wildwuchs** entsteht. Um zielgerichtet mit dem Ausbau der Windenergie weiterfahren zu können wird nun – in **Übereinstimmung mit einem parlamentarischen Postulat** und teilfinanziert vom BFE, ARE und BUWAL - ein **Nationales Konzept Windenergie [2c]** erarbeitet.

Internationale Zusammenarbeit

Unterstützt vom BFE und vom ARE läuft eine Eingabe für das **Interreg-Projekt: Wind harvest in the alpine space. Potentials and technical, legal and social conditions for an expanding sector of renewable energy sources**. Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, die bislang fehlende Grundlagenforschung zur Nutzung dieser vielversprechenden Energieform im alpinen Raum durchzuführen und Anknüpfungspunkte für die Realisierung konkreter Projekte zu schaffen. Im Zentrum der Betrachtung stehen dabei die politisch-ökonomischen Rahmenbedingungen sowie Aspekte des Naturschutzes, des Tourismus und der technischen Machbarkeit.

Seit Mai 2002 beteiligt sich die Schweiz am *IEA-Implementing Agreement on Wind Energy*

Research and Development, Annex XIX Wind Energy in Cold Climates. Mit dem Papier *Wind Energy Assessment in Harsh Climatic Conditions* [28] konnte ein wichtiger Input zu diesen internationalen Aktivitäten gegeben werden.

Mit dem *Deutschen Windenergie Institut (DEWI)* [29] bestehen enge Beziehungen. So wurden wesentliche Inputs der **Aus- und Weiterbildungskurse im Bereich Windenergie** von diesem Institut eingebracht.

Es bestehen gegenseitige **Mitgliedschaften** von Suisse Eole mit der deutschen, der französischen und der europäischen Windenergievereinigung und der Fördergesellschaft für erneuerbare Energien in Freiburg im Breisgau.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

POSITIVE ENTWICKLUNGEN

- Das Gütsch-Projekt ist zum heutigen Zeitpunkt das eigentliche **Schlüsselprojekt** der schweizerischen Windbranche aus folgenden Gründen:
 - Bau und Erschliessung unter schwierigen Bedingungen
 - Keine Einsprachen gegen Baubewilligung
 - Erfahrungen im harschen Klima
 - Darstellung der Möglichkeiten (und Einflüsse) der Windenergienutzung im Gebirge
- Eine breit angelegte **Umfrage bei 400 Haushalten** der Schweiz (*Réceptivité des ménages*)

au développement des sites éoliens [30]) zeigt beim Bekanntheitsgrad der erneuerbaren Energien die **Windenergie an zweiter Stelle**, hinter der Sonne und vor der Wasserkraft. 89% der Befragten stehen einem Weiterausbau der **Windenergie positiv** gegenüber.

- Über 50 Personen des öffentlichen Lebens figurieren als **Erstunterzeichner** in einem Unterstützungskomitee für die Windenergie
- Die **Nachfrage nach Ökostrom** aus Windenergie ist immer noch hoch – gerade auch zur Erfüllung des Fördermodells von naturemade.
- Die **Elektrizitätsbranche** engagiert sich zunehmend an Windkraftprojekten.

BREMSENDE ENTWICKLUNGEN

- Die baureifen Projekt entwickeln sich **sehr viel langsamer** als vorgesehen. Gründe sind Planungsunsicherheit und teilweise Opposition bei konkreten Projekten.
- Die Stiftung für Landschaftschutz und der Schweizerische Heimatschutz haben Einsprache gegen das Projekt Crêt Meuron gemacht, was zu einer **starken Verzögerung** dieses Vorhabens führt.
- **Die Unsicherheiten im Strommarkt** nach der EMG-Abstimmung führen zu einer weiteren Zurückhaltung bei neuen Projekten – insbesondere bei unabhängigen Stromproduzenten.

AUSBLICK

Was will das Programm Wind bewirken? Im **Entwurf zum Energieforschungskonzept Wind 2004-2007** halten wir fest:

- Bis ins Jahr 2010 sollen 50 – 100 GWh Elektrizität in der Schweiz mit Windenergieanlagen erzeugt werden, was **10 - 20% der Ziele von EnergieSchweiz** im Bereich der neuen erneuerbaren Energien entspricht.
- Mit spezifischen Forschungsschwerpunkten zur Windenergienutzung im hügeligen und gebirgigen Terrain wird weiteres Know How erarbeitet, um **Schweizer Unternehmen** auch im **weltweit boomenden Windenergiemarkt Erfolgchancen** zu ermöglichen.
- Aufbau eines **Kompetenzzentrums Windenergienutzung im Gebirge**.

Forschung und Entwicklung

Im Zentrum steht die Entwicklung von **spezifischen Anlagekomponenten und -konzepten**

für klimatisch raue Bedingungen (Eis, Kälte, Turbulenzen), mit hoher Verfügbarkeit (erschwerte Zufahrt, auch für *Off-shore*) und zur Montage mit schwieriger Erschliessung (Hubschrauber). Konkret sind dies:

- Entwicklung von **Know how zur Projektentwicklung** in komplexem Terrain, Erarbeiten von Planungshilfen
- Entwicklung von angepasster **Modellierungssoftware** für Site Assessments, Validierung, Optimierung
- Entwicklung von **Messapparaturen** für raue klimatische Bedingungen
- Optimierung von **Leistungselektronik** im MW-Bereich
- Entwicklung von **wartungsfreien Generatoren** mit variabler Drehzahl
- Entwicklung **von intelligenten Rotorblättern**
- Einsatz der **Nano-Technologie** zur Verhinderung von Verschmutzung und Vereisung der Rotorblätter
- Weiterentwicklung von **kostengünstigen Kleinanlagen** als Ergänzung zur Stromproduktion im Inselbetrieb und für sich entwickelnde Länder.

Erhöhung der Akzeptanz der Windenergienutzung

- Fundierte **Auswertung des Einflusses** von Windkraftanlagen auf Fauna, Flora und Tourismus über längere Zeiträume
- Erarbeitung von **Richtlinien** zur Ausgestaltung von Projekten mit geringem Einfluss, in Zusammenarbeit mit den Umweltschutzorganisationen und der Windenergiebranche
- **Evaluation** des Beitrages der Windenergienutzung zu einer nachhaltigen Energieversorgung, Integration in Gesamtstrategien

Dezentrale Stromproduktion in Randregionen

- Windenergie als Ergänzung zur Stromproduktion in Netzlösungen, Ökostromstrategien als **zusätzliche Ertragsmöglichkeiten** von Energieversorgern in Randregionen, Marketingstrategien
- Geschickte **Beteiligungsmodelle** für die lokale Bevölkerung an Projekten – Akzeptanz
- Unterstützung von **Standortabklärungen** mit spezifischen Anforderungen
- Windenergie als Ergänzung zur **Stromproduktion** im Inselbetrieb bei Alpengenossenschaften, für die Länder des Südens, etc.

Betriebserfahrungen

- Betrieb von **Test-Anlagen** im Gebirge, Auswertung Betriebserfahrungen, Integration in neue Anlagenkonzepte, sowohl für Netzverbund, kleine Inselnetze wie auch stand-alone-Anlagen
- **Internationale Zusammenarbeit** – auch Im Rahmen der IEA und der EU

Liste der Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET.

- [1] Hans-Rudolf Henz (info@metron.ch), METRON RAUMPLANUNG AG, *Brugg*, www.metron.ch: **Die Berücksichtigung der Windenergie in der Richt- und Nutzungsplanung**, (SB), ENET 210189
- [2] Stefan Kunz (kunz@meteotest.ch), METEOTEST, *Bern*, www.meteotest.ch: **a) Windkraftanlagen auf dem Internet** (SB) ♦ **b) FACTS: Windberechnungen am Beispiel des Gütsch** (SB), ENET 220169 ♦ **c) Nationales Konzept Windenergie**
- [3] Dr. Bruno Brühwiler (bruno.bruehwiler@eurorisk.ch), EURO-RISK, *Zürich*: **Risk Management Windenergie Schweiz** (SB)
- [4] AREGGER ROLAND (aregger_feldmoos@freesurf.ch), *Rengg*: **Windverhältnisse Region Mettilimoos-Obwyden** (SB), ENET 220233
- [5] Ch. Kapp (info@nek.ch), NEK UMWELTTECHNIK AG, *Zürich* www.nek.ch: **a) Potential- und Standortabklärungen für ein Windenergieprojekt auf dem Grimselpass** (SB), ENET 220220 ♦ **b) Windenergieprojekt auf dem Gotthardpass** (SB), ENET 220273 ♦ **c) Projekt-relevante Studien und Abklärungen im Zusammenhang mit einem Windenergieprojekt auf dem Gotthardpass** (JB)
- [6] ROLF FUCHSER, *Detlingen*: **Windmessung Igelrain** (SB), ENET 220224
- [7] Daniel Steinemann (daniel.steinemann@ch.abb.com), ABB ENERGIE SERVICES SCHWEIZ, *Zürich*: **Windmessungen DEMO-WKA St. Moritz** (SB), ENET 220234
- [8] Thomas Weisskopf (weisskopf.thomas@bluewin.ch), WEISSKOPF PARTNERS, *Zürich*: **3 Windenergie-Standorte Laax** (SB)
- [9] Peter Krüsi (aventa@energienetz.ch), ARGE AVENTA, *Winterthur* www.aventa.ch: **a) Nutzung der Windenergie im Kt. Graubünden**, (JB), ENET 230001 ♦ **b) Standortabklärungen / Messprojekt Leichtwindanlage AVENTA**, (JB), ENET 230001
- [10] Eric Nussbaumer (info@adevsolarstrom.ch), ADEV, *Liestal*: **La Racine** (SB)
- [11] René Vuilleumier rene.vuilleumier@seven.vd.ch, SEVEN, ÉTAT DE VAUD: **2^e étape du Parc d'éoliennes de Sainte-Croix** (JB)
- [12] Michel Zabelka (mzabelka@access.ch), OEKOPLAN, *Zürich*: **Standortabklärungen Aroser Weisshorn** (JB)
- [13] Jakob Kubli (jakob.kubli@gl.ch) BAUDIREKTION KT. GL, *Glarus*: **Windmessung in der Linthebene** (JB)
- [14] Christian Müller-Schöll (christian.mueller-schoell@forum21.ch), FORUM 21, *Illnau-Effretikon*: **Windmessung in Illnau Effretikon** (JB)
- [15] Max Schneider (schneider-m@bluewin.ch) WINDWATT SA, *Carouge*: **Mesures et études d'impacts pour éoliennes à Saint-Brais, JU** (Abbruch)
- [16] Mehmet Hanagasioglu (INTERWIND@compuserve.com), INTERWIND, *Zürich*, www.interwind.ch: **Begleitung Leichtwindanlage AVENTA** (JB), ENET 220261
- [17] N. Wüthrich (wch@zhwin.ch) GENSOL MARTELLA, *Marthalen*: **Erstellen einer Leichtwindanlage auf dem Siloturm der Landi Marthalen** (JB)

- [18] ANTON MARTI, *Rüttenen: Leichtwindanlage Rüttenen* (JB)
- [19] Markus Russi (ew-ursern@bluewin.ch) ELEKTRIZITÄTSWERK URSERN, *Andermatt*: www.ew-ursern.ch: **850-kW-WKA Gütsch** (JB)

Referenzen

- [20] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2000 – 2003**, ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, www.energie-schweiz.ch/bfe/de/forschung
- [21] Jens-Peter Molly, Geschäftsführer des Deutschen Windenergie-Instituts (DEWI): www.wind-energie.de/aktuelles-und-aktivitaeten/aktuelles.htm
- [22] H. Buser et al.: **Windkraft und Landschaftschutz**, 1996, ENET 197201
- [23] S. Kunz et al.: **Planung von Windenergieanlagen**, 1999, ENET 196305
- [24] **Schweizerische Vereinigung für Windenergie, Suisse Eole**: www.suisse-eole.ch
- [25] **Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz AEE**: www.aee.ch
- [26] **Verein für umweltgerechte Elektrizität (VUE)**: www.naturemade.org
- [27] METEOLABOR, *Wetzikon*, www.meteolabor.ch/: **Vereisungssicheres Anemometer NOWA**
- [28] Beat Schaffner (schaffner@meteotest.ch), METEOTEST, *Bern*, www.meteotest.ch: **Wind Energy Assessment in Harsh Climatic Conditions** 2002
- [29] **Deutschen Windenergie Institut DEWI**: www.dewi.de
- [30] Michel Voisard (mediactif@swissonline.ch) MEDIACTIF, *Vevey*: **Réceptivité des ménages au développement des sites éoliens**

KLEINWASSERKRAFTWERKE

Überblicksbericht zum P+D-Programm 2002

Programmleiter: Hanspeter Leutwiler

pk@iteco.ch



Die langsame und leise Wasserkraftschnecke schont Enten und Fische

Die Wasserkraftschnecke des Kleinwasserkraftwerks am Grütbach in Derendingen wird fertig montiert gesetzt, was die Bauzeit verringert. (FOTO: *Ritz-Atro Pumpwerksbau GmbH*)

Programmschwerpunkte und avisierte Ziele

Die Projektziele gemäss Jahresplan 2002 waren:

- **Pilot- und Demonstrationsanlagen:** Konsolidierung und Abschluss laufender Projekte. Für Folgejahre sollen aus Effizienzgründen wenige grössere Projekte statt viele Kleinprojekte akquiriert werden.
- **Projektierungsarbeiten:** Beiträge an Vorstudien der kumulierten Leistung von 500 bis 4'000 kW, je nach Grösse der eingereichten Projekte.
- **Indirekte Massnahmen im regulären Budget:** Die regelmässig nachgefragte Information und Beratung soll weitergeführt und ihre Effizienz verbessert werden. Über diesen Kanal sollen auch Signale zur Glättung der Verunsicherungen aus der Politik verbreitet werden und Medien entsprechend bedient werden.
- **Indirekte Massnahmen im Sonderbudget (Sonderkredit Parlamentsbeschluss):** Beschleunigungsaktionen mit Grobanalysen für institutionelle Bauträger (Trink- und Abwasserkraftwerke sowie eine kantonale Aktion).
- **Direkte Massnahmen Projektwettbewerb (Sonderkredit Parlamentsbeschluss):** Es wird mindestens ein besonders attraktives Demonstrationsprojekt mobilisiert.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

Die Arbeiten konnten gemäss Jahresplan durchgeführt werden. Die Information und Beratung mit **drei sprachregionalen Infostellen** wurde weitergeführt und effizienter gestaltet, insbesondere durch den Ausbau der digitalen Informationsvermittlung und der westschweizer Angebote [27]. Die jährlich stattfindende zweisprachige **Fachtagung** mit einem Workshop über die Umweltzertifizierung wurde diesmal zum Thema Elektrizitätsmarktgesetz durchgeführt. Im Rhythmus von ca. 5 Jahren führt das Programm *Kleinwasserkraftwerke* einen **Branchenworkshop** durch, welcher 2002 auch wegen der Ablehnung des Elektrizitätsmarktgesetzes fällig war [24].

Mit den Geldern aus dem Sonderkredit 2002 wurden Beschleunigungsaktionen mit Grobanalysen und der genannte Branchenworkshop finanziert. Für den Projektwettbewerb wurden 5 Projekte mobilisiert, von welchen eines gestartet wurde. Es handelt sich um die Erneuerung einer gewerbehistorisch und wasserbaulich interessanten Ausleitanlage an der Entlen [22]. Das Projekt ist in das Projekt *Biosphärenreservat Entlebuch* eingegliedert und wird 2003 fertiggestellt.

Die **Beiträge an Planungsarbeiten** bilden ein effizientes Instrument des Programms *Kleinwasserkraftwerke*. Sie umfassen die Vorstudienphase und bei kleineren Projekten auch das Bewilligungsprojekt. Ein guter Teil des Erfolges liegt in der Niederschwelligkeit des Angebotes: Die Gesuche werden nur nach Formfragen geprüft und

die Beiträge nach einem fixen Tarif zugesprochen. Dieses Modell funktioniert allerdings nur, solange die Gesuche wie bisher innerhalb des Budgetrahmens bleiben.

Im Berichtsjahr wurden Beiträge an **11 neue Vorstudienprojekte** verfügt, wovon drei bereits abgeschlossen sind [11, 13, 21] und es wurden **10 Vorstudien abgeschlossen** [9, 10, 12, 14-20]. Deren kumulierte Leistung von 2.7 MW zeigt ein beträchtliches Potenzial zur Elektrizitätsproduktion auf. Erfahrungsgemäss [25] wird davon gut die Hälfte realisiert, was einen **Zuwachs von fast 6 GWh Jahresenergie** oder 1 % Zuwachs in der entsprechenden Leistungsklasse ergibt.

Die Mehrzahl der Anlagen ist unter den heutigen Rahmenbedingungen wirtschaftlich. Die Werte in der Projekt-Liste sind allerdings mit Vorsicht zu geniessen, weil sich durch Unvorhergesehenes und Wünsche von Kunden und Anliegern Mehrkosten und durch höhere Umweltauflagen Mindererträge ergeben können. Die drei Projekte mit Gestehungskosten von 19 bis 22 Rp./kWh [13, 14, 18] haben über Sponsoringinstrumente auch gewisse Chancen auf Realisierung.

Die gut 2 Dutzend heute bei ENET erhältlichen Vorstudienberichte verschiedenster Typen von Kleinwasserkraftwerken bieten eine ausgezeichnete Orientierungshilfe für Projektinitianten und Grobanalysen. Für drei Vorstudien, die wegen Problemen noch nicht fertiggestellt sind, wurden in Vorjahren Beiträge gesprochen.

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*. Im Verband sind Besitzer und Betreiber sowie die spezialisierte Anbieterbranche und interessierte Institutionen vertreten. Das

Programm ist in allen 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).

Internationale Zusammenarbeit

Der ISKB arbeitet kontinuierlich mit den Bruderverbänden in Nachbarländern, mit der *Europäischen Kleinkraftwerksvereinigung* (ESHA) und mit Tagungsveranstaltungen im Ausland zusammen. Technisch und kommerziell ist der europäische Ausrüstermarkt massgebend, wohingegen der

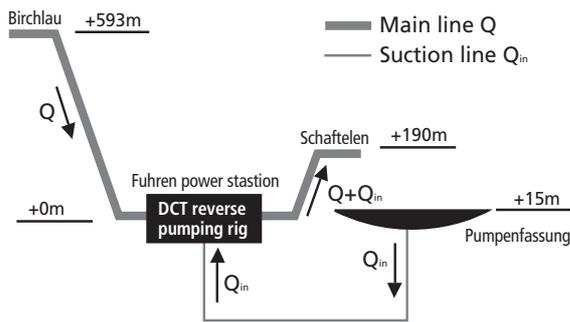
Schweizer Anbietermarkt stark geschrumpft ist. Das Netzwerk informiert sich laufend bei den führenden Firmen in Europa über die Markttenendenzen. Bei den Informationsstellen gehen regelmässige Anfragen aus dem Ausland ein.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Wasserkraftschnecke in Derendingen [1]: Die archimedische Schraube (s. Titelbild) erbringt im Wasserkraftbetrieb höhere Wirkungsgrade als ein Wasserrad. Mit ihrem grossen Kanal und der langsamen Drehung vermag sie Enten und Fische kaum zu gefährden und ist wenig empfindlich gegen Schwemmgut. So genügt ein grober Personenschutzrechen, wodurch sich die Kosten für die Rechenreinigung und Geschwemmselbehandlung drastisch verringern. Bei guter Wartung läuft die Maschine ohne wesentlichen Luft- und Körperschall. Im Spätfrühling 2003 erfolgt die Inbetriebsetzung. Der Schlussbericht wird nach einem vollen Betriebsjahr erstellt, mit der Umsetzung wird jedoch schon 2003 begonnen. Ein Potenzial für diese Anwendung besteht an vielen stillgelegten Niederdruckstandorten.

Pilotprojekt für Druckerhöhung mit Doppelkonustechnologie (DCT) bei der KWO [2] (1999 - 2002): Nach der Laborentwicklung wurde die Doppelkonustechnologie an den Leitungen im Kraftwerk *Führen der Kraftwerke Oberhasli* (KWO) in grösserem Massstab getestet und weiter entwickelt. Die Einrichtung nutzt die hydraulische Energie aus dem 593 m höher gelegenen *Birchlai*, um Wasser mit 180 m Förderhöhe nach *Schaftelen* zu pumpen (Figur 1). Dabei werden zwei Doppelkonen eingesetzt. Die Druckerhöhung funktioniert ohne rotierende Teile.

Das Projektziel des Nachweises der Funktionstüchtigkeit der DCT für eine Energieumsetzung in der Grössenordnung von einigen Kilowatt Leistung wurde erbracht. Die Grenzen der Belastbarkeit (wegen übermässiger Lärmentwicklung und Selbstzerstörung der DC-Einheiten durch die hohen Wassergeschwindigkeiten) konnten erweitert werden und wurden in einem praktikablen Bereich ausgetestet. Die Entwicklungsfähigkeit des noch sehr tiefen Wirkungsgrades wurde demonstriert. Mit weiterer Entwicklungsarbeit kann die DCT für kleine Anwendungen an Orten ohne Stromversorgung attraktiv werden. Das Projekt wurde neben dem BFE durch den Projekt und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL) und den Kanton Bern unterstützt. Auskunft über das Projekt erteilt die *Double Cone AG* in Thun. Parallel zur Wasserkraftanwendung lief ein von der Kommission Technologie und Innovation (KTI) unterstütztes Projekt für die Anwendung in Entsalzungsanlagen, welches auch beachtliche Resultate erzielte. Das nächste Ziel der *DCT AG* ist die Suche nach einem Partner, welcher die Entwicklung bis zur Marktumsetzung trägt. Das Programm *Kleinwasserkraftwerke* versucht, 2003 ein P+D-Projekt mit DC-Technologie in einer echten Kleinkraftwerk-Anwendung unter marktnahen Bedingungen zu starten.



Figur 1: Von der Pilotanlage genutzte Druckleitungen und Druckhöhen (Quelle: DCT AG)

Entwicklung von Niederdruck-Kleinturbinen im Kleinturbinenlabor MHyLab [3] (1999 - 2002): Das Projektziel der Entwicklung einer Niederdruckturbine einfacher und kostengünstiger Bauart wurde erreicht. Die Lösung des MHyLab besteht in einer Laufrad-regulierten Rohrturbine mit festen Leitschaufeln und vereinfachten Konturen. Der Prototyp wurde mit 4 Laufschaufeln erstellt. Dieses Turbinenmodell eignet sich für den Einsatz von 4 bis 10 m Nutzgefälle. Eine erste Anwendung konnte bereits verwirklicht werden (Kleinwasserkraftwerk *La Farette*, Ende 2002 in Betrieb gesetzt). Der PSEL finanzierte das Projekt wesentlich mit. Zum Teil waren auch Studenten von der Polytechnischen Hochschule Grenoble beteiligt. Das Projekt wird im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes weitergeführt: Um Nutzgefälle bis 30 m abzudecken, werden Modelle mit bis zu 8 Laufschaufeln entwickelt.

Beim Programm *Kleinwasserkraftwerke* werden die **P+D-Schlussberichte von Kraftwerken** erst nach Abschluss der Erfahrungen eines vollen ersten Betriebsjahres und Behebung allfälliger Probleme eingereicht. Von den folgenden inhaltlich bereits **abgeschlossenen Projekten wurden die Schlussberichte im Berichtsjahr veröffentlicht:**

Kleinwasserkraftwerk Sursee mit gewässer-ökologischer Aufwertung [4] (In Betrieb gesetzt: Ende 2001): Zusammen mit der Reaktivierung des Kleinwasserkraftwerks wurden die Fischgängigkeit und Auenbiotope wiederherge-

stellt. Das Projekt erbrachte sowohl einen energetischen als auch einen ökologischen Nutzen.

Drehzahlregelung zur Wirkungsgradoptimierung beim Wasserrad Kislig in Oberbüren [5] (In Betrieb gesetzt: 1999 / 2000): Über eine elektronische Erfassung des Drehmoments wird die Drehzahl derart geregelt, dass die Becher des Wasserrades optimal gefüllt bleiben, was einen besseren Wirkungsgrad ergibt. Diese Drehzahlvariation ist auch für andere Anwendungen geeignet: Wasserkraftschnecken, Pumpen im Turbinenbetrieb, Turbinen mit fixen Laufschaufeln usw., insbesondere für spezielle Regelaufgaben wie variable Nutzgefälle (vgl. früheres P+D-Projekt [22]).

KWK Rüttenen: Bergwasser des Seeligsbergtunnels energetisch nutzen [6] (In Betrieb gesetzt: 1998): Die Besonderheit dieser Nutzungsart liegt beim chemisch belasteten Bergwasser, was eine besondere Sorgfalt bei der Materialwahl der wasserberührten Bauteile bedingt. Das Demonstrationsprojekt verdeutlicht das Potential der Nutzung von Berg- und Drainagewasser.

KWK Wannenfloh: Niederdruckkraftwerk mit innovativen Technologien [7] (In Betrieb gesetzt: 1999): Das neue Durchlaufkraftwerk nutzt das Gefälle von zwei Wasserbauschwellen in der Emme. Mit dem Projekt wurde auch die Fischgängigkeit hergestellt (Umgebungsgewässer). Es wurden möglichst kostengünstige und umweltfreundliche Bauteile eingesetzt, insbesondere ein Schlauchwehr und ein Lochblechrechen. Das Projekt zeigt auf, wie wasserbauliche Schwellen landschafts- und gewässerfreundlich für die Energieproduktion genutzt werden können.

KWK Perlen: Ultra-Niederdruck mit einfach-geregelten Saugheber-Kaplanturbinen [8] (In Betrieb gesetzt: Ende 1999): Die Saugheberanordnung erlaubt den Verzicht auf Absperrorgane. Ist das Wasserdargebot wie im vorliegenden Falle ziemlich ausgeglichen, so können ohne Energieverlust gegenüber einer klassischen Lösung kostengünstige einfachregulierte Turbinen eingesetzt werden. Die Investitionskosten wurden mit diesen Massnahmen mehr als 20 % verringert, und die Maschinensicherheit wurde erhöht.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

PILOT- UND DEMONSTRATIONS-PROJEKTE

Angesichts der schwindenden Fabrikantenbranche in der Wasserkraftindustrie, der schwierigen Wirtschaftslage und der Unsicherheit in der Energiepolitik (EMG) war es schwierig, grössere industrielle P+D-Projekte zu akquirieren. Für aktive Aktionen mit der Industrie waren zudem die Budgets in den letzten Jahren zu klein. Die Unsicherheit wegen dem Modell jährlicher Budgets ist bei der Wasserkraft mit langer Projektlaufzeit besonders hemmend. Trotzdem hält das Interesse kleiner Akteure an, welche sich im Bereich der Einfachkonstruktionen für kleinere Anlagen engagieren. Vor allem im Niederdruckbereich gibt es Potenzial für zusätzliche Nutzungen und Handlungsbedarf für technisch-wirtschaftliche Innovationen. Neben exotischen Bauformen sind vor allem drehzahlvariable Konzepte und Einfachbauarten vielversprechend. Diese Innovationen weisen ein Exportpotenzial auf - die Marktchancen können jedoch in diesem Rahmen nicht beurteilt werden.

Neue Impulse kommen vom Ökostrommarkt, welcher sich nun im Rahmen der Angebote des jeweils lokal zuständigen Elektrizitätsverteilungunternehmens entwickelt. Mittelfristig sind Impulse vom freien Zertifikathandel zu erwarten, welcher ohne physischen Stromtransport abgewickelt wird. Hier haben die Kleinwasserkraftwerke dank ihrer vergleichsweise niedrigen Energiegestehungskosten intakte Chancen. Neben technischen Innovationen sind Demonstrationsprojekte für die folgenden Anwendungen gesucht: Abwasserkraftwerke in der Deutschschweiz und gute Lösungen für Kleinwasserkraftwerke in landschaftlich empfindlichen Gebieten mit Schutzauflagen.

PLANUNGSARBEITEN

Das Ziel, Beiträge an Vorstudien für ca. 2 MW Leistung zu bewilligen, wurde erreicht. Das Budget konnte nicht ganz ausgeschöpft werden, wahrscheinlich auch wegen der Verunsicherung durch das EMG. Es zeigt sich, dass vor allem für kleinere Projekte Hilfe beansprucht wird, und dass grössere Projekte wegen der Potenzialausschöpfung und wegen der schlechten Wirtschaftslage seltener werden. Es ist sinnvoll, zukünftig auch Grobanalysen aus diesem Budget zu finanzieren und damit die budgetmässig überbeanspruchte Information & Beratung zu entlasten.

Von einem Laborprojekt abgesehen, handelt es sich bei all diesen P+D-Projekten und Vorstudien

um Massnahmen bei bestehenden Kraftwerken und um neue Kraftwerke an bestehenden Rohr- und Wehreinrichtungen. D.h. kein Projekt nutzt einen bisher ungenutzten Gewässerabschnitt. Dies ergibt eine ausgezeichnete Umweltbilanz.

INDIREKTE MASSNAHMEN UND P+D-SCHWERPUNKTE

Bisherige Strategie und Erfolge

Bisher verstand sich das Netzwerk Kleinwasserkraftwerke als vollständige Branchenvertretung und Drehscheibe. Strategie war, möglichst allen sich ernsthaft engagierenden Personen weiterzuhelfen und sie zu ermutigen. Dem *Mininetzwerk Kleinwasserkraftwerke* ist es innerhalb eines guten Jahrzehnts gelungen, die heterogenen Kräfte zu vereinen und ein Branchenbewusstsein zu schaffen. Die Zuwachsraten von mehr als dem Doppelten der grösseren Wasserkraftwerke, und der grössere Absolutzuwachs als andere alternative erneuerbare Energieträger, belegen diese Dynamik. Mit bescheidenem Aufwand wurden beachtliche politische Erfolge erzielt (Wasserzinserslass, Einspeisevergütungen nationale Ausgleichsregelung usw.). Ohne die Rückenstärkung durch die indirekte Förderung wäre dies nicht möglich gewesen.

Aktuelle Probleme

Mit den gestiegenen Anforderungen für den Überbau von EnergieSchweiz und mit dem gewachsenen Themenspektrum ist die Programmleitung derzeit unterkritisch finanziert. Die Evaluatoren der Netzwerke [26] empfehlen deshalb, das Breitenengagement und die Öffentlichkeitsarbeit aufzugeben, d.h. nur noch gezielt wirksame P+D-Projekte zu verfolgen. Am genannten Branchenworkshop wurde im Gegensatz dazu offensichtlich, dass die Öffentlichkeitsarbeit aus politischen Gründen verstärkt werden sollte. Der ISKB will vor allem die Internetpräsenz der einzelnen Kraftwerke verbessern. Die Unterstützung von Pico-Kraftwerken erscheint zwar direkt wenig effizient, diese Anlagen bilden jedoch ein sehr wirkungsvolles PR-Fenster der Wasserkraft. Grössere konventionelle Projekte haben genügend professionelle Eigendynamik, benötigen ausser den Vorstudienbeiträgen kaum Starthilfen, und es gibt immer weniger Potenzial. Das Optimum für die Effizienz der Förderung liegt deshalb bei den mittleren Leistungsklassen.

Lösungsansätze

Zur Entlastung der Programmleitung übernimmt das BFE 2003 die Vertragsabwicklung der Vorstudien und die Ansprechstelle für Erstkundinnen und Infomaterial. Im weiteren will die Programmleitung diverse Leistungen weitergehend über Selbstbedienung im Internet zugänglich machen oder mindestens per e-Mail statt Post verbreiten.

Die Aktion, zögerlichen Projektträgern kostenlose Grobanalysen anzubieten, hat zu einer grösseren Nachfrage als die vorgesehenen Budgetmittel

geführt. Die Aktion wird deshalb 2003 weitergeführt. Einzelne Begünstigte haben bereits weitergehende Planungsarbeiten eingeleitet - die Vorstudienförderung bringt einen wesentlichen Anreiz.

Die Blitzstarts anfangs 2002 und 2003 haben aufgezeigt, dass auf dem Weg von Projektwettbewerben rasch viele Projekte mobilisiert werden können. Eine wirklich breite Ausschreibung in allen Sprachregionen würde ein grosses Potenzial an den Tag bringen.

Liste der P+D-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

- [1] T. Köhli, thomaskoehli@yahoo.com, *Kriegstetten: Demonstrationskraftwerk alte Ziegelei am Grützbach, Derendingen* (SB: Erfahrungsbericht auf Mitte 2004 geplant)
- [2] J. Stark, dct@netsurfer.ch, Double-Cone Technology AG, *Thun: Doppelkonus Technologie (DCT) im Kraftwerk Führen bei den KWO* (kein Bericht veröffentlicht)
- [3] Stiftung Kleinturbinenlabor MhyLab, denisV@mhylab.com, *Montcherand: Kleinturbinenlabor, Montcherand; Turbines Basse chute* (SB)
- [4] A. P. Engel, hydrelec@dplanet.ch, *Mandach*, und Genossenschaft Windenergieanlagen alois.fuchs@winterthur.ch, *Diegenstal: Kleinwasserkraftwerk Sursee, Innovatives Konzept zur Korrektur von ökologischen Fehlleistungen aus früheren Eingriffen in die Suhre* (SB) ENET 220236
- [5] B. Wepfer, Ingenieurschule *Grenchen-Solothurn: Elektrifizierung Wasserrad Kislig, Oberwil bei Bühren* (SB) ENET 210321
- [6] K. Odermatt, k.odermatt@ewn.ch, EW Nidwalden, *Stans: Kleinwasserkraftwerk Rütene; Nutzung des Bergwassers aus dem Seelisbergtunnel* (SB) ENET 210315
- [7] A. P. Engel, hydrelec@dplanet.ch, *Mandach: Demonstrationsprojekt Kleinwasserkraftwerk Wannenfluh in Rüderswil; Innovatives Konzept eines Niederdruckkraftwerks am voralpinen Wildwasserfluss Emme bei Ramsei* (SB) ENET 210317
- [8] ITECO Ingenieurunternehmung AG, iteco@iteco.ch, *Affoltern a.A.: Demonstrationsprojekt Saugheber-Turbinen Perlen* (SB) ENET 210313 (1000 kW, 2.7 m, 8 GWh, Reaktivierung, 10 Rp./kWh)
- [9] D. Müller, dieter.mueller@colenco.ch Colenco Power Engineering, *Baden: Kleinwasserkraftwerk Mühlau, Vorprojekt* (SB) ENET 220111 (635 kW, 4.5 m, Produktionserhöhung von 2 GWh auf 3.6 GWh, 10 Rp./kWh)¹
- [10] J. Burri und F. Binder, josef.burri@im-maggia.ch, Ing.-büro Maggia, *Locarno: Vorstudie Kleinwasserkraftwerk im Roos Chemiefaser Ebnat Kappel* (SB) ENET 220176 (924 kW, 9.2 m, Produktionserhöhung von 400'000 kWh auf 4.1 GWh, 11 Rp./kWh)
- [11] J. Burri und F. Binder, josef.burri@im-maggia.ch, Ing.-büro Maggia, *Locarno: Reaktivierung Kleinwasserkraftwerk Mühle, Ebnat Kappel* (SB) ENET 220238 (111 kW, 23 m, 685'000 kWh, 12.4 Rp./kWh)
- [12] A. P. Engel und D. Zimmermann, hydrelec@dplanet.ch, *Mandach: Usine électrique de Choindez sur la Birse; Projet destiné au renouvellement de l'usine électro-mécanique* (SB) ENET 220237 (600 kW, 25 m, 3'100'000 kWh, 14 Rp./kWh, verschiedene Varianten)

- [13] M. Wohlfender u.a., info@revita.ch, Stiftung Revita, *Langenbruck: Vorstudie Kleinwasserkraftwerk Hägler-Mühle, Lausen; Revitalisierung des historischen Kraftwerks* (SB) ENET 220170 (62 kW, 9 m, 250'000 kWh, 22 Rp./kWh)
- [14] R. Hunziker, ohunziker@bluewin.ch, *Nidau: Kleinwasserkraftwerk Twannbach, Twann* (SB) ENET 220155 (60 kW, 48 m, 238'000 kWh, 20 Rp./kWh)
- [15] A. P. Engel, hydrelec@dplanet.ch, *Mandach: Vorprojektstudie für ein Dotierkraftwerk Stropfel, Untersiggenthal* (SB) ENET 220154 (350 kW, 2 m, 1'700'000 kWh, 13.4 Rp./kWh)
- [16] D. Graber, sciorini@sciarini.ch, Ing.-büro Gianfranco Sciarini, *Vira Gambarogno: Trinkwasserkraftwerk Abbondio*. Nur interne Berichtsmaterialien verfügbar (27 kW, 224 m, 205'000 kWh, ca. 11 Rp./kWh)
- [17] EPS Eco Power Systems AG, epspower@swissonline.ch, *Zug: Kleinwasserkraftwerk Kett, Einsiedeln; Vorstudie* (SB) ENET 210322 (34 kW, 7.2 m, 160'000 kWh, 13 Rp./kWh)
- [18] H.-P. Hauri, hauri_energie@bluewin.ch, *Schwyz: Vorstudie Kleinwasserkraftwerk Bisisthal, Quellen Oberer Schwarzenbach* (SB) ENET 210316 (13 kW, 73 m, 105'000 kWh, 20 Rp./kWh, Nutzung von Verwurfwasser)
- [19] B. Dubochet, info@imetron.ch, Imetron AG, *Brienz: Vorstudie Trinkwasserkraftwerk Bieli, Hasliberg-Hohfluh* (SB) ENET 210314 (25 kW, 158 m, 158'000 kWh, 15 Rp./kWh)
- [20] A. P. Engel u. a., hydrelec@dplanet.ch, *Mandach: Vorsprojektstudie Kleinwasserkraftwerk Cerneux Gorgé, Moutier, La Birse* (SB) ENET 210318 (180 kW, 7 m, 920'000 kWh, 15 Rp./kWh)
- [21] P. Eichenberger, main@entec.ch, Entegra Wasserkraft AG, *St. Gallen,: Stauanlage Buchholz an der Glatt, Projekt zur Sanierung der Staumauer und Nutzung der Wasserkraft* (SB) ENET 210323 (100 kW, 11 m, 413'000 kWh, 19 Rp./kWh) Dieses Projekt wurde im Sonderkredit 2003 zur Realisierung ausgewählt!
- [22] Fritz Duss, Duss & Sohn, *Hasle LU: Sanierung der Oberwasserführung beim Kleinwasserkraftwerk Entlen, Entlebuch* (Bericht auf Ende 2003 geplant)

Referenzen

- [23] H. Biner und M. Dubas; *Neue Technologien für Kleinwasserkraftwerke* (SB) ENET 194143 (drehzahlvariabler Turbinenbetrieb einer Radialpumpe zur Regelung des Ausgangsdruckes für die direkte Einspeisung in das Trinkwasserverteilnetz)
- [24] M. Willemsen, mwillemsen@hispeed.ch, *St. Gallen*, und H. Leutwiler, hpleutwiler@iteco.ch, *Affoltern a.A.: Kleinwasserkraftwerke nach der EMG-Abstimmung, Workshop Olten 19.12.03* (SB)
- [25] J. Kuster und P. Suter, j.kuster@hanserconsulting.ch, BHP Hanser & Partner, *Zürich,: Bundesbeiträge an Vorstudien für Kleinwasserkraftwerke; Realisierungsstand der Vorstudienprojekte 1993 bis 2001, Kurzevaluation der Wirkung der Bundesbeiträge (1996)* (SB) ENET 220140
- [26] S. Rieder u.a, Interface Politikstudien, *Luzern: Evaluation Netzwerk Kleinwasserkraftwerke* (der SB wird 2003 veröffentlicht)
- [27] *Internetsite des Programms Kleinwasserkraftwerke: www.smallhydro.ch*

¹ Werte in Klammer: Installierte elektrische Leistung, Brutto-Nutzgefälle, mittlere jährliche Produktionserwartung, Energiegestehungskosten

NUKLEARE SICHERHEIT UND ENTSORGUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2002

J. Peter Hosemann

peter.hosemann@psi.ch



ENTSORGUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE: Diffusionszelle

Am PSI wurde eine neuartige Diffusionszelle entwickelt, in der man den Druck verändern kann. Damit können Transportvorgänge in Opalinuston-Bohrkernen aus verschiedenen Tiefen realitätsnah untersucht werden.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Planung des Forschungsbereichs *Nukleare Energie und Sicherheit (NES)* des *Paul Scherrer Instituts (PSI)* geht davon aus, dass die Kernkraftwerke mit einem Produktionsanteil von rund 40% neben den Wasserkraftwerken ein Hauptpfeiler der Schweizer Stromerzeugung bleiben, und dass die Schweizer Kernkraftwerke Strom zu einem Preis produzieren können, der sie auch im deregulierten Markt konkurrenzfähig bleiben und mögliche Besitzerwechsel überstehen lässt.

Angesichts der von der Schweiz in Kyoto eingegangenen Verpflichtungen und im Lichte neuer Erkenntnisse zur Klimaproblematik wird die weitgehend CO₂-freie Stromerzeugung in Kernkraftwerken an Bedeutung weiter zunehmen. Nimmt man es mit der Konkretisierung des Gebotes zur Nachhaltigkeit ernst, dann werden die Vorzüge der Kernenergie gegenüber Alternativen deutlicher. Ähnlich gute oder bessere Versorgungsoptionen sind weltweit auf absehbare Zeit entweder erheblich teurer oder im grossen Massstab noch nicht einsetzbar. Die Ergebnisse des Projektes «Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen» (*GaBE*) am *Paul Scherrer Institut* beweisen dies eindrücklich. Sie werden deshalb auch zur Steuerung der Forschung genutzt (s. u.).

Die Nutzung der Kernenergie lässt sich auch deshalb weiterhin rechtfertigen, weil das Risiko gering und damit vertretbar ist, weil das Betriebsverhalten der Schweizer Kernkraftwerke gut ist und weil der Sicherheitsstandard, absolut und im internationalen Vergleich gesehen, hoch ist. Der Erhalt dieser Merkmale ist eine Daueraufgabe, die allerdings unter neuen erschwerenden Vorzeichen steht:

- Das neue Atomgesetz wird voraussichtlich keine Begrenzung der Betriebszeit der heutigen Kernkraftwerke vorsehen. Von den Kernkraftwerkbetreibern angestrebte Betriebsdauerverlängerungen lassen Alterungs- und Lebensendefragen noch stärker in den Vordergrund treten.
- Die Frage der Sicherheit von Kernkraftwerken und ihre öffentliche Wahrnehmung hat noch längst nicht zur Erhöhung der Akzeptanz der Kernenergie geführt. Auch die Entsorgung von radioaktiven Abfällen wird noch immer als ungelöstes Problem perzeptiert. Diesen Aspekten müssen nach wie vor die Forschungsprogramme Rechnung tragen.
- Der Kostendruck deregulierter Märkte zwingt fortwährend zur Suche nach kostengünsti-

gen Lösungen, die aber nur bei Wahrung der gebotenen Sicherheit akzeptabel sind.

- Ein Nachwuchsmangel zeichnet sich ab. Wenn dagegen nichts unternommen wird, könnte eine ausreichende inländische Kompetenz gefährdet werden.

Dementsprechend ist Sicherheitsforschung für den Betrieb von Kernkraftwerken weiterhin wichtig. Eine verlässliche unabhängige Beurteilungskompetenz ist für die Gesellschaft in der Schweiz unerlässlich. Dies gilt auch für die Entsorgungsforschung, die nötig ist, um eine sichere Lagerung radioaktiver Abfälle voranzutreiben und entsprechende Projekte zu implementieren.

Die politische Vorgabe, die Nutzung der Kernenergie als Option offen zu halten, die Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz zu planen und die verschiedenen internationalen Verpflichtungen, welche die Schweiz eingegangen ist, zwingen zum Aufbau einer Beurteilungskompetenz für potentielle Neuanlagen und zugehöriger Brennstoffzyklen. Das ist jedoch nur möglich, wenn sich die Schweiz an internationalen Entwicklungen durch aktive Mitarbeit beteiligen kann. Wie schon im 4. und 5. Rahmenprogramm der EU wird auch das 6. Rahmenprogramm Beteiligungen auf Europäischer Ebene bieten, jetzt aber vermehrt über die angestrebte Bildung von *Networks of Excellence* und *Integrated Projects*. Darüber hinaus verfolgt das *Generation IV NPP Initiative International Forum (GIF)* von bisher 10 Ländern unter der Führung der USA das Ziel, zukunftsweisende Anlagenkonzepte und zugehörige Brennstoffzyklen auf das Jahr 2030 hin zu entwickeln. Dementsprechend ist die vorausschauende Forschung zu verstärken, damit sich die Schweiz bei einem hohen Nutzen/Kosten-Verhältnis wirkungsvoll beteiligen kann. Die darin investierten projektgebundenen Mittel sichern Expertise und garantieren innovative Forschung, die auch junge Leute anzieht, und die damit das Nachwuchsproblem lindern kann.

Die für den Forschungsbereich *NES* entsprechend der Planung zur Verfügung stehenden öffentlichen Mittel dürfen nicht weiter abnehmen, sondern müssen stabil bleiben, oder eher wieder leicht steigen, wie dies in anderen Ländern bereits der Fall ist. Ein gesamthaft deutlich über 40% hinausgehender Anteil an privater Finanzierung könnte die Unabhängigkeit und die umsetzbare Glaubwürdigkeit der Forschung gefährden.

Die Kernenergieforschung des Bundes ist derzeit klar auf die beiden Schwerpunkte «Sicherheit von Kernreaktoren» und «Entsorgung radioaktiver Abfälle» ausgerichtet. Im Zentrum des Interesses stehen dabei das Verhalten der Reaktorsysteme bei Störfällen und das Verhalten der eingesetzten Materialien und Komponenten mit zunehmender Einsatzdauer sowie das verbesserte Wissen über die Rückhaltemechanismen eines zukünftigen Endlagers und der umgebenden Geosphäre. Ferner werden neue Anforderungen bis hin zum Gebot der Nachhaltigkeit an zukünftige Kernanlagen, Brennstoffkonfigurationen und -zyklen

aktiv verfolgt. Entsprechende technische Lösungen werden bewertet und es werden punktuelle Entwicklungsbeiträge geleistet.

Dabei muss die Kompetenz in Schlüsselbereichen der vordersten Front des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik entsprechen. Der Ausbildung von fachlichem Nachwuchs in Kooperation mit den Hochschulen wird besonderes Gewicht beigemessen. Im genannten Rahmen werden auch wissenschaftliche Expertisen erarbeitet und Dienstleistungen erbracht; der sichere Betrieb der im Rahmen dieser Forschung notwendigen nuklearen Anlagen ist zu gewährleisten.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

SICHERHEIT UND SICHERHEITSBEZOGENE BETRIEBSPROBLEME SCHWEIZERISCHER KERNKRAFTWERKE

STARS [1] (Sicherheitsexpertise und -forschung bezüglich Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz): Gemäss dem wissenschaftlichen Begleitkomitee verfügt das Projekt über herausragende Fähigkeiten und führt Arbeiten durch, wie sie für eine TSO (technical service organization) der HSK typisch und notwendig sind. Damit wurde das wichtigste Ziel erreicht, das heisst: *Unterstützung der schweizerischen Kernenergieszene durch Arbeiten von hoher Qualität.*

2002 wurde u.a. das folgende Szenario einer Transiente analysiert: Das Speisewassersystem erleidet eine schnelle Druckentlastung nach dem Turbinenabfall, weil der Dampfmassenstrom zum Aufheizen des Kondensates ausbleibt. Wenn die Druckentlastungsrate zu gross ist, kann der Förderdruck der Speisewasserpumpen durch Kavitation so weit abfallen, dass ihr Durchsatz drastisch sinkt. Das bewirkt eine höhere Tourenzahl der Pumpen. Wenn die Kavitation wegen erhöhter Unterkühlung beendet ist, fördern die Pumpen so viel Speisewasser in den Reaktordruckbehälter, dass dieser rasch aufgefüllt wird. Und dies wiederum führt folgerichtig zur Reaktorschnellabschaltung wegen zu hohen Wasserstandes im Reaktordruckbehälter. Im betroffenen Kernkraftwerk galt es, durch Modifikationen die Druckentlastungstransiente so zu reduzieren, dass in den Speisewasserpumpen keine Kavitation auftreten kann. Das Projekt STARS bot die analytische Unterstützung für die durchgeführten Änderungen in der Anlage. Um das sehr detaillierte Speisewas-

system modelltechnisch zu kalibrieren, wurde ein tatsächlich vorgekommener Störfall mit Lastabwurf analysiert, bei dem sich der Rückgang der Förderleistung der Speisewasserpumpen als Schlüsselphänomen herausgestellt hatte. Die Modellierung dieses Störfalles verlangt eine genaue Voraussage des Drucks im Speisewasserbehälter. Da nur spärlich Messdaten vorlagen, um die Rand- und Anfangsbedingungen für das Modell zu definieren, bestand ein wichtiger Schritt darin, den gemessenen Druckabfall im Speisewassersystem zu erklären. Es wurde angenommen, dass sich am Boden des sehr grossen Speisewasserbehälters eine Schicht mit leicht überhitztem Wasser befindet. Damit wurde es möglich, den Beginn der Druckabsenkung durch Vergleich mit den Messdaten genau zu markieren. Mit dem kalibrierten Modell konnten mögliche Änderungen im Kontrollsystem der Reaktoranlage und die Sensitivität von wichtigen Parametern ermittelt werden, die zur Ausarbeitung von Empfehlungen führten. Ein neuer Test des Turbinenabwurfs wurde im Herbst 2002 durchgeführt. Er zeigte die Wirksamkeit der vorgeschlagenen Modifikationen an der Anlage. Wie vorgesehen, trat kein Abfall der Pumpenförderleistung auf. Eine detaillierte Analyse dieses Tests ist in Arbeit.

Mit der erfolgreichen Teilnahme am internationalen Benchmark zum Turbinenschnellschluss überprüfte das Projekt STARS die Fähigkeit zur transienten Systemanalyse mit dreidimensionaler Neutronenkinetik in Siedewasserreaktoren im internationalen Rahmen. Interessante Ergebnisse wurden in einer Doktorarbeit zum Stabilitätsverhalten von Siedewasserreaktoren vorgelegt. Mit RAMONA-Rechnungen konnte ein stark von der Störungsamplitude abhängiges Stabilitätsverhal-

ten nachgewiesen werden, was auf das Vorliegen einer subkritischen Hopf-Bifurkation (bei der aus einem Fixpunkt ein periodischer Orbit entsteht) hinweist. Die Güte der Abbrandrechnung wurde anhand von Messdaten des *ARIANE*-Programmes überprüft. Die Unsicherheitsanalyse wurde erstmals auf eine reaktorphysikalische Fragestellung (Abbrandrechnung) angewandt.

HUMAN RELIABILITY ANALYSIS (HRA) [2]: Hypothetische Szenarien mit menschlichen «errors of commission» (*EOC*), die im Jahr 2002 identifiziert worden sind, haben die Wichtigkeit der Dynamik in der Entwicklung von Störfällen deutlich gemacht. Mögliche menschliche Fehler und deren abgeschätzte Wahrscheinlichkeiten sind diejenigen Produkte einer *HRA*, die in probabilistischen Risikoanalysen benutzt werden, um die Sicherheit der Reaktoranlage beurteilen zu können. Es hat sich nun gezeigt, dass Fehlerart und Fehlerwahrscheinlichkeit ausserordentlich sensitiv gegenüber der Störfalldynamik sein können. Die Entwicklung von auf Simulation beruhenden Rechenwerkzeugen, mit denen die Zusammenhänge des Anlagenverhaltens in Verbindung mit den automatischen Systemen und den Operateuren gemeinsam erfasst werden können, konzentriert sich auf dieses Problem. Für Szenarien, bei denen die Störfalldynamik eine besonders wichtige Rolle spielt, müssen längerfristig, auf der Basis einer weiterentwickelten Ereignisbaumtechnik, dynamische Risikobewertungen eingeführt werden. Vor diesem Hintergrund wurde eine Zusammenarbeit mit der Universität von Maryland, USA, ins Leben gerufen, um gemeinsam an der Analyse der dynamischen Aspekte von Thermochockbeanspruchungen zu arbeiten. Erste Rechenläufe mit einem dynamischen «Probabilistic Safety

Assessment»-Modell (*PSA*) auf der Basis eines dynamischen Ereignisbaums für den Bruch einer Hauptdampfleitung wurden erfolgreich durchgeführt. Das dynamische *PSA*-Modell vereint *RELAP* für das thermohydraulische Anlagenverhalten mit einem Modell für die Handlungen der Betriebsmannschaft und mit einem probabilistischen Bruchmechanikmodell (*PFM*). Die Thermochockbeanspruchung resultiert aus einer rapiden Abkühlung des Reaktors, einem raschen Wiederaufbau des Drucks im Reaktordruckbehälter und der Dauer dieser nicht bestimmungsgemässen Zustände. Das *PFM*-Modell berechnet die bedingte Wahrscheinlichkeit für den Bruch des Druckbehälters, die wiederum von den Handlungen der Operateure in jeder Phase des Störfalls abhängt. Mit dem dynamischen *PSA*-Modell lassen sich die gegenseitigen Abhängigkeiten des Verhaltens der Anlage und des Verhaltens der Betriebsmannschaft näher betrachten. Das führt zu besseren Voraussagen der zeitlichen Handlungssequenzen der Operateure, die direkten Einfluss auf die Thermochockbeanspruchung haben. Das dynamische Ereignisbaummodell benötigt Untermodelle der Schlüsselentscheidungen der Operateure sowie der wahrscheinlichen Handlungsabläufe und deren Alternativen. Diese zu entwickeln und zu charakterisieren, ist der Schwerpunkt der laufenden Forschung. Trotz des grossen Aufwands hinsichtlich analytischer und modelltheoretischer Komplexität könnte die dynamische Risikoanalyse in Zukunft die einzige Möglichkeit sein, die Wechselwirkungen zwischen Anlageverhalten und Operateurverhalten zu quantifizieren.

LWR-PROTEUS [3]: Die Phase II des Projekts *LWR-PROTEUS* besteht aus verschiedener Forschungsaktivitäten zu hoch abgebranntem Brenn-

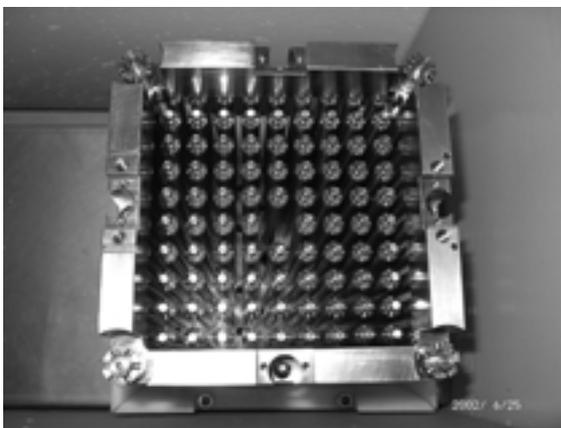


Fig. 1: Druckwasserreaktor-Brennstoffmockup für Reaktivitätsmessungen (Proben sind im Zentrum platziert)

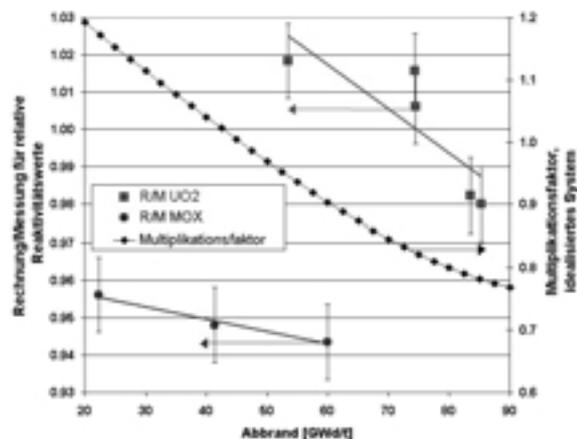


Fig. 2: Typische Abnahme des Multiplikationsfaktors infolge des Abbrands und erste Vergleiche von Rechnung/Experiment

stoff aus Schweizer Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren. Die Untersuchungen schliessen experimentelle Reaktorphysik ebenso ein wie detaillierte chemische Analysen. Eine der wichtigsten reaktorphysikalischen Grössen, die für abgebrannten Brennstoff studiert werden, sind das Mass für das Abweichen des Reaktors vom kritischen Zustand (Reaktivität) oder das Verhältnis der Neutronenzahl in einer Neutronengeneration zur Neutronenzahl in der unmittelbar vorhergegangenen (Multiplikationsfaktor). Beide sind ein integrales Mass für die Fähigkeit, mit dem Brennstoff eine Kettenreaktion im Reaktor aufrecht zu erhalten. Mit dem Verbrauch des nuklearen Brennstoffs durch Kernspaltung nimmt die Reaktivität monoton ab. Dies hat zwei Ursachen: Zum einen wird das spaltbare Material nach und nach verbraucht, zum anderen werden die Neutronen immer häufiger von neu entstandenen Nukliden (Actiniden, Spaltprodukte, Nachzerfallsprodukte) eingefangen. Wie weit der Brennstoff abgebrannt werden kann und wie lange er im Reaktorkern verbleiben kann, hängt von der Reaktivität des Kerns ab. Deshalb ist eine genaue Kenntnis dieser Grösse notwendig, um auch die Zykluslänge und das Brennstoffverhalten zu kennen. Die Abnahme der Reaktivität mit wachsendem Abbrand muss besonders für Hochabbrand-Brennelemente studiert werden.

Im Jahr 2002 wurden je zwei experimentelle Kampagnen mit speziellen frischen Brennstoffproben und mit abgebrannten Brennstoffproben aus dem Kernkraftwerk Gösgen durchgeführt. Der Reaktor *LWR-PROTEUS* wurde neu konfiguriert, indem die *SVEA-96+* Brennelemente durch *OPTIMA*-Brennelemente vom KKW *Leibstadt* ausgetauscht

wurden. Das zentrale Testmodell in natürlicher Grösse (eine Anordnung von 11x11 Druckwasserreaktor-Brennstäben, s. **Fig. 1**) wurde mit zwei verschiedenen Arten der Moderation untersucht: einerseits mit normalem Leichtwasser (demineralisiertes H_2O) und andererseits mit einem Gemisch aus Leichtwasser und Schwerwasser (H_2O/D_2O). Mit dem letzteren Gemisch wurde das Verhältnis von Brennstoff zu Moderator in einem tatsächlichen Druckwasserreaktor bei voller Leistung simuliert. Die abgebrannten Brennstoffproben wurden, mit Hilfe eines speziell entworfenen und gebauten Behälters, vom HOT-Labor im *PSI* zum Reaktor *PROTEUS* transportiert, der gleichzeitig als Probenwechsler diente.

Eine typische Abnahme des Multiplikationsfaktors infolge Abbrands in einem idealisierten System, das aus einer unendlichen Anordnung von Urandioxid-Stäben mit 5 Gw% anfänglicher ^{235}U -Anreicherung besteht, ist in **Fig. 2** dargestellt. In derselben Figur ist ein erster Vergleich zwischen gerechneten (*BOXER*) und gemessenen Unterschieden der Reaktivität von abgebrannten UO_2 - und *MOX*-Proben für eine Reihe von Abbrandstufen und einer frischen Referenzprobe gezeigt. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass der Reaktivitätsverlust für *MOX* schwieriger vorauszusagen ist als für UO_2 und ebenso schwieriger für hohe Abbrandstufen als für niedrigere.

Zusätzlich zu den Reaktivitätsmessungen wurde damit begonnen, die chemische Zusammensetzung von komplementären Brennstoffproben zu untersuchen. Auch wurden Neutronenradiographien von frischen Brennstofftablets angefertigt. Für das Jahr 2003 sind weitere Experimente mit borierterem Wasser als Moderator geplant.

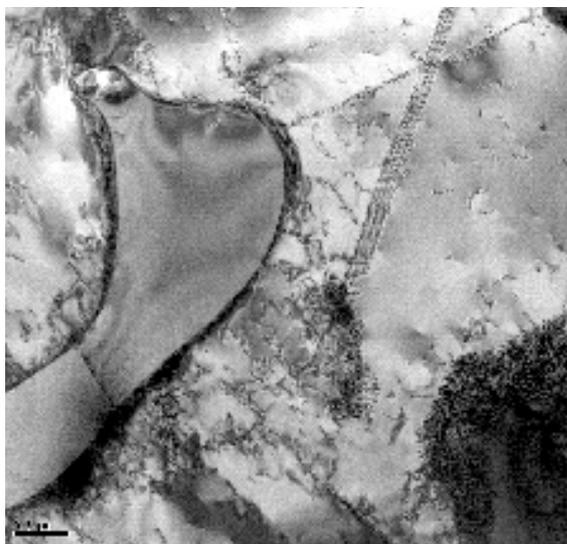


Fig. 3: Mikrostruktur nahe an der Schweissnaht

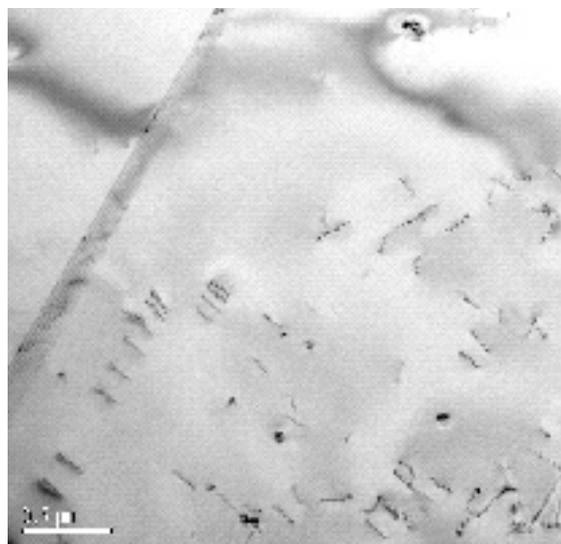


Fig. 4: Mikrostruktur fern der Schweissnaht

Ferner sollen sowohl UO_2 - und MOX-Druckwasserreaktor-Brennstoffproben als auch zwei Siedewasserreaktor-Brennstoffproben experimentell untersucht werden.

EDEN [4]: Die Eigenschaften von austenitischen Schweissungen sind wichtig für die Abschätzung der Restlebensdauer von Einbauten in Leichtwasserreaktoren. Typische Schweissnähte an Standard-austeniten 304 bis 347 werden im Projekt *INTERWELD* des 5. Rahmenprogramms der EU studiert. Von besonderem Interesse für das *PSI* sind die mechanischen Eigenschaften der Schweissung (Grundmaterial und Wärmeeinflusszone), ihre Mikrostruktur und ihre Eigenspannungsverteilung. Dazu werden Spannungs-Dehungs-Kurven ermittelt und werden Charakterisierungen mit TEM und Neutronenbeugung durchgeführt.

Zur Bestimmung der effektiven Belastung eines mechanischen Bauteils genügt es nicht, nur die von aussen verursachten Spannungen zu ermitteln. Man muss auch den bereits bestehenden inneren Spannungszustand im Material berücksichtigen. Die sogenannten Eigenspannungen überlagern sich den Spannungen im Material, die durch äussere Kräfte am Bauteil erzeugt werden. Ein spezielles Verfahren zur Spannungsanalyse beruht auf der Beugung von Röntgen- oder Neutronenstrahlen. Bei Neutronen werden dazu üblicherweise Instrumente verwendet, die entweder die Streuung winkelabhängig oder die Flugzeit der Neutronen bei festem Streuwinkel messen. In beiden Fällen muss man einen Kompromiss bezüglich der Forderungen nach hoher Auflösung oder nach hoher Intensität eingehen. An der *SINQ* des *PSI* hat man einen neuen Weg eingeschlagen, um Auflösung und Intensität unabhängig von einander zu optimieren. Auf der Messstrecke eines Flugzeitgerätes bewegt sich jeweils nicht nur einer, sondern viele einander überlappende Neutronenpulse, was die Intensität steigert. Dann aber können die schnellen Neutronen von verschiedenen Folgepulsen die langsameren der vorangegangenen Pulse überholen. Das heisst aber, dass von einzelnen detektierten Neutronen die Flugzeit und damit deren Wellenlänge nicht mehr eindeutig bestimmt werden kann. Im neu entwickelten Diffraktometer *POLDI* werden deshalb die Flugzeiten winkelaufgelöst gemessen. Dadurch verfügt man über eine zusätzliche Bestimmungsgrösse, um doch wieder die Abstände der Netzebenen im Material und damit die durch Eigenspannungen verursachte Dehnung eindeutig ermitteln zu können.

In **Fig. 3** und **Fig. 4** sind die Mikrostrukturen im Material zum Vergleich gegenübergestellt, und zwar in der Nähe der Schweissnaht und in

einigem Abstand. In der Nähe der Schweissnaht erkennt man stark verformte Gebiete und Rekrystallisierungen. Daraus lässt sich auf einen Anstieg der Eigenspannungen gegenüber denen im unbeeinflussten Material schliessen. Dies konnte durch erste Messungen mit *POLDI* bestätigt werden. Die hohen Eigenspannungen könnten eine direkte Folge der grossen Unterschiede in der Mikrostruktur sein. Zusätzlich wurde noch das Verformungsverhalten untersucht. Mikrostrukturelle Zwillingsbildung konnte als wichtiger Deformationsmechanismus bei Raumtemperatur erkannt werden; bei höheren Temperaturen (300 °C) wurde hauptsächlich Versetzungsgleiten gefunden. Spannungsabhängigkeiten wurden nicht entdeckt. In einem nächsten Schritt wird in gleicher Weise radioaktives bestrahltes Material untersucht werden.

BAUTEILSICHERHEIT [5]: Die Zielsetzung des Projektes *FEVER* bestand darin, an einem konkreten Anwendungsfall mikrostrukturelle Veränderungen zu identifizieren, die den Ermüdungsprozess auslösen, beeinflussen oder begleiten und die einhergehende Änderung der physikalischen Eigenschaften mittels zerstörungsfreier Methoden zu messen. Aufgrund der grossen Bedeutung für die Sicherheit und Verfügbarkeit der Kernkraftwerke wurde als Anwendung die niederzyklische Ermüdung in Rohrleitungen des Primärkreislaufes ausgewählt, die bei An- und Abfahrvorgängen sowie im Teillastbetrieb infolge von Temperaturschichtungen und anderen Strömungsphänomenen auftritt. Bisher erfolgt die Ermüdungsüberwachung mit der Kontrolle der Beanspruchungen am Bauteil durch Temperatur- und Dehnungsmessungen und mit zerstörungsfreien Verfahren zur Detektion technischer Risse (> 3-5 mm). Die Untersuchungen in *FEVER* sollten zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, direkt am Bauteil eine umfassende Materialzustandsanalyse vorzunehmen. Es wurde untersucht, ob die deformationsinduzierte Martensitbildung, die bei Ermüdung in den rostfreien austenitischen Rohrleitungsstählen unter bestimmten Bedingungen auftritt, als Alterungsindikator genutzt werden kann. Für die Material- und Versuchsbedingungen in *FEVER* (Stahl X6CrNiTi18-10, Serie 1,2 lösungsgeglüht, Serie 3 kaltverformt, beaufschlagte totale Dehnamplitude 0.40 %, Temperaturbereich 20-260 °C) konnte nachgewiesen werden, dass bei Ermüdung ein linearer Zusammenhang zwischen dem Martensitgehalt und der Lastwechselzahl besteht. Dabei hing die Martensitbildungsrate vom Materialausgangszustand ab. Es ist demzufolge notwendig, Kennlinien für die relevanten Materialzustände aufzustellen. Für den betrachteten Anwendungsfall kam nur der lösungsgeglühte Ausgangszu-

stand in Frage, da die Fertigung der dickwandigen Rohre keine andere Möglichkeit zulässt. In *FEVER* wurde die Martensitbildung nur bei einer konstanten Dehnungsamplitude untersucht. Die realen Beanspruchungen an den Rohrleitungen setzen sich aus Temperatur- und Dehnungszyklen zusammen, die meistens nicht synchron ablaufen. Deshalb müssen weitere Untersuchungen zeigen, welchen Einfluss die Belastungsgeschichte (variable Dehnamplitude, variable Temperatur etc.) auf Martensitbildung und Lebensdauer haben und ob die akkumulierte plastische Dehnung ein zuverlässiges Mass für die Bauteilbeurteilung ist.

Eine wesentliche Einflussgrösse auf die Martensitbildung stellte die Temperatur dar. Für die untersuchten Material- und Versuchsbedingungen konnte ermittelt werden, dass sich der Zusammenhang von Martensitgehalt mit steigender Temperatur sehr gut mit einer abfallenden Exponentialfunktion beschreiben lässt. Die Parameter dieser Funktion hängen jedoch vom Materialausgangszustand, der beaufschlagten Dehnamplitude und vom Erschöpfungsgrad ab. Um aus dem Martensitgehalt am Bauteil auf den Erschöpfungsgrad schliessen zu können, müssen die wesentlichen Temperaturen und Dehnungen am Bauteil bekannt und die entsprechenden Martensit-Temperatur-Kurven bestimmt sein. Die Entwicklung eines Werkstoffmodells, das alle wesentlichen Einflussgrössen auf die Martensitbildung berücksichtigt, d.h. chemische Zusammensetzung des Stahls, Ausgangsversetzungsdichte, Dehnungsamplitude und Temperatur, würde den experimentellen Aufwand reduzieren und die praktische Anwendung wesentlich beschleunigen. Erste Schritte in diese Richtung sind unternommen und werden im Projekt *DIAGNOSTIK* verstärkt.

Für die mikrostrukturellen Untersuchungen wurden metallographische Methoden sowie Beugungsverfahren auf der Basis von Neutronen- und Synchrotronstrahlung eingesetzt. Die Metallographie ergab qualitative Informationen zu Art, Form und Verteilung des Martensits in den Ermüdungsproben. Es wurde ausschliesslich lattenförmiger Martensit beobachtet, der als typische Struktur des α' -Martensits gilt. Der Martensit war in einem zylindrischen Kern um die Probenachse konzentriert, der von Zylinderschalen mit Martensit umgeben war, deren Dichte zur Oberfläche hin abnahm. Diese Strukturen sind wohl als typische Erscheinung des Stangenmaterials anzusehen. Eine quantitative Bestimmung des Martensitgehalts mittels metallographischer Methoden war nicht möglich. Mit der Neutronendiffraktometrie wurde eine Methode gefunden,

mit der eine genaue Bestimmung des Martensitgehalts in den Ermüdungsproben möglich war. Da die Neutronendiffraktometrie als Methode zur Phasenanalyse verifiziert ist, wurden die Messungen als Referenz für die zerstörungsfreien magnetischen Methoden verwendet. Die Messungen mit der Methode der Röntgendiffraktometrie auf der Basis von Synchrotronlicht ermöglichten Übersichtsaufnahmen der Martensitverteilung in den metallographischen Quer- und Längsschliffen mit einer quantitativen Auswertung. Es konnte beobachtet werden, dass mit zunehmendem Martensitgehalt die Verteilung des Martensits in den Ermüdungsproben homogener wurde.

Zur Detektion des Martensitgehalts mittels zerstörungsfreier magnetischer Methoden wurden ein einfaches Handprüfgerät zur Bestimmung der magnetischen Permeabilität (*Ferromaster*), *Fluxgate*- und *SQUID*-Magnetometer zur Messung der Restfeldstärke nach vorheriger Magnetisierung sowie ein *GMR*-Messsystem zur Bestimmung der Wirbelstromimpedanz eingesetzt. Das Handprüfgerät *Ferromaster* erwies sich als sehr vorteilhaftes und praktisches Messmittel. Ein Vorteil neben der einfachen Handhabung besteht darin, dass die Messgrösse ferromagnetische Anteile in relativ grossen Tiefen erfasst (grösste Empfindlichkeit in Stahl bei einer Tiefe von 10 mm), so dass die Werte der Permeabilität auf den Martensitgehalt aus der Neutronendiffraktometrie bezogen werden können. Die Messung mit *Ferromaster* ergab einen linearen Zusammenhang der magnetischen Permeabilität mit dem Martensitgehalt. Die *Fluxgate*- und *SQUID*-Sonden sind sehr empfindliche Sensoren zur Magnetfeldmessung und wurden im Projekt zur Messung der Restfeldstärke eingesetzt. Ein Nachteil für den praktischen Einsatz des Restfeldverfahrens besteht darin, dass das Bauteil vorher örtlich, z.B. mit sogenannten Jochmagneten, magnetisiert werden muss. Weiterhin ist eine magnetische Abschirmung der Sensoren und im Falle von *SQUID*, eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff notwendig, was die Handhabbarkeit und die Zugänglichkeit zum Bauteil erschwert. Deshalb wird ihr Einsatz wohl auf das Labor beschränkt bleiben. Die magnetische Messgrösse Restfeldstärke ist direkt an den Martensitgehalt gekoppelt und erfasst auch tieferliegende ferritische Anteile. Die Untersuchungen ergaben einen linearen Zusammenhang von Restfeldstärke und Martensitgehalt. Die genannten Nachteile von *Fluxgate* und *SQUID* bestehen für das *GMR*-Messsystem nicht. Deshalb hat es gute Chancen für einen praktischen Einsatz. Der *GMR*-Sensor wurde in *FEVER* zur Messung der Wirbelstromimpedanz genutzt. Da die Messgrösse auf diverse mikrostrukturelle und geometrische Parameter

empfindlich ist, müssen diese entweder konstant gehalten oder die Messsignale entsprechend der verschiedenen Einflüsse getrennt werden. Je nach Prüffrequenz bleibt die Information auf den mehr oder weniger tiefen Oberflächenbereich begrenzt. Falls die Möglichkeit des Abfahrens der Oberfläche gegeben ist, kann eine magnetische Karte erstellt werden. Diese Möglichkeit wurde in *FEVER* genutzt, um die Martensitverteilung an der Oberfläche der Ermüdungsproben zu ermitteln. Dabei wurde beobachtet, dass in den Rissbereichen eine starke Martensitkonzentration vorlag. Demnach löste die Entstehung des technischen Risses zusätzliche Beiträge an Martensitumwandlungen aus. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass unter gewissen Einschränkungen eine Bauteilbewertung und Ermüdungsfrüherkennung mittels zerstörungsfreier magnetischer Prüfmethoden möglich ist. Unter den Voraussetzungen, dass der Materialausgangszustand und die Belastungsbedingungen bekannt sind, wird aus einer materialspezifischen Bewertungskennlinie, die den Zusammenhang von akkumulierter Belastung und magnetischer Messgröße beschreibt, der Erschöpfungsgrad für den aktuellen Wert der magnetischen Kenngröße abgelesen. Die Bestimmung der materialspezifischen Bewertungskennlinien erfordert einen entsprechend hohen Aufwand. In *DIAGNOSTIK* sind Messungen an neuwertigen und ermüdeten Rohrleitungsstücken im Labor und auch direkt im Kernkraftwerk Gösgen mit *Ferromaster* und *GMR*-Messtechnik vorgesehen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts *RIKORR* wird das Risskorrosionsverhalten von ferritischen Reaktordruckbehälter-Stählen (unbeeinflusster Grundwerkstoff und Wärmeeinflusszonen) und von Druckbehälter-Schweissgutwerkstoffen unter transienten und stationären Betriebsbedingungen von Siedewasserreaktoren experimentell untersucht. Das Projekt hat eine Vielzahl neuer Ergebnisse und Erkenntnisse geliefert. Das beobachtete Risswachstumsverhalten kann zur Zeit am besten durch eine Kombination und Überlagerung der folgenden Mechanismen verstanden werden: Oxidfilmbruch/Anodische Auflösung (Film Rupture/Anodic Dissolution (*FRAD*)), Wasserstoffinduzierte Risskorrosion (Hydrogen-assisted cracking (*HAC*)) und Dynamische Reckalterung (Dynamic Strain Ageing (*DSA*)). Bei Temperaturen $\geq 120 - 180$ °C und mittleren Festigkeitswerten ($R_p \approx 300 - 500$ MPa) dominiert der *FRAD*-Mechanismus. Bei Temperaturen $\leq 120 - 180$ °C oder bei hoher Festigkeit / Härte ($R_p \geq 800$ MPa, ≥ 350 HV) dominiert die wasserstoffinduzierte Risskorrosion. Bei geeigneten Kombinationen von Temperatur (150 – 300 °C) und Belastungsgeschwindigkeit ($10^{-8} \text{ s}^{-1} \leq d\epsilon/dt \leq 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) und einem anfälligen

Werkstoff (hohe Konzentration an freiem N und C) kann auch *DSA* wesentlich zum Rissfortschritt beitragen. *DSA* ist dabei allerdings keine Voraussetzung für das Auftreten von Environmental-assisted Cracking (*EAC*) in diesen Stählen.

Das *EAC*-Wachstum langer Risse ($> 100 \mu\text{m}$) im Grundwerkstoff wird im wesentlichen durch die Rissspitzendehnrates und die Konzentration an schwefelhaltigen Anionen (SO_4^{2-} , HS^- , S^{2-}) im Rissspitzenelektrolyt (bzw. dem pH) kontrolliert. Für das Auftreten von *EAC* müssen im Bereich der Rissspitze kritische Bedingungen, d.h. eine ausreichend hohe Konzentration an S-haltigen Anionen (niedriger pH) und eine langsame positive Dehnrates, gleichzeitig auftreten und aufrechterhalten werden. Die Rissspitzendehnrates wird im wesentlichen durch die Belastungsgeschwindigkeit ($d\epsilon/dt$, dK/dt) und -höhe (ϵ , K , ΔK), durch das Risswachstum selbst sowie durch das Deformationsverhalten (R_p , Verfestigung, *DSA*, Viskosplastizität) des Materials bestimmt. Die Konzentration an S-haltigen Anionen wird im wesentlichen durch die Auflösung der MnS-Einschlüsse im Risskanal, die Konzentration an S-haltigen Anionen im Kühlmittel sowie durch den Stofftransport im Risskanal durch Diffusion, Migration und Konvektion bestimmt. Ein hohes Korrosionspotential (Migration) und eine niedrige Strömungsgeschwindigkeit (vernachlässigbare Konvektion) begünstigen die Anreicherung von S-haltigen Anionen im Bereich der Rissspitze und somit eine hohe *EAC*-Risswachstumsrate.

Es wurden klare Hinweise auf einen Einfluss der *DSA* auf das *EAC*-Risswachstumsverhalten gefunden, zumindest bei gewissen Kombinationen von Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit sowie einem anfälligen Material (niedriger Al-Gehalt, hoher Gehalt an freiem N und C). Die Ergebnisse zeigen deutlich die Notwendigkeit für weitergehende Untersuchungen mit RDB-Stählen mit hoher *DSA*-Anfälligkeit sowie Schweissnähten und ihren Wärmeeinflusszonen (*WEZ*), insbesondere bei mittleren Temperaturen von 200 – 270 °C, auf. Ebenso wurden Hinweise für eine gegenüber dem bainitischen Gefüge deutlich erhöhte Anfälligkeit für dehnungsinduzierte Risskorrosion (*DRK*) und Spannungsrissskorrosion (*SpRK*) eines martensitischen und stark aufgehärteten Gefüges mit Härten > 350 HV5 gefunden. Ähnliche Gefügezonen, wenn auch deutlich weniger stark aufgehärtet, werden z. T. auch in der *WEZ* von Schweissnähten beobachtet. Das Testen kritischer Zonen in der *WEZ* erfordert den Einsatz spezieller Kompaktzugproben mit Rundkerbe, da nur so gewährleistet werden kann, dass ein *EAC*-Riss in der kritischsten Zone initiiert wird.

Die ASME XI „Wet“ Risswachstumskurven im ASME BPV Regelwerk beschreiben das experimentell in sauerstoffhaltigem Heisswasser (simulierte SWR/NWC-Bedingungen) beobachtete SpRK-Risswachstumsverhalten ferritischer RDB- und Rohrleitungsstähle nur unzureichend und ungenau. Es wird deshalb vorgeschlagen, neue Referenzkurven auf Basis eines einfachen Superpositions-Modells und der „Time-Domain“ Analyse für SWR/NWC- und SWR/HWC- Bedingungen zu entwickeln. Die vorgeschlagene Methode vermag sowohl das mittlere Materialverhalten realistisch aber dennoch ausreichend konservativ wiederzugeben als auch den starken Einfluss der Belastungsfrequenz mitzuberechnen. Die kritischen niederfrequenten Belastungen mit vergleichsweise hohen Rissfortschritten pro Zyklus sind charakteristisch für An- und Abfahrvorgänge sowie für spezielle Betriebszustände mit Temperaturschichtungen. Es ist zu berücksichtigen, dass sowohl Zeitdauer als auch Zyklenzahl stark begrenzt sind, und die hohen Rissfortschritte keineswegs eine Gefahr für die Sicherheit darstellen müssen. Für eine schlüssige Bewertung sind weitere Experimente insbesondere bei niedrigeren Belastungen und genauere Informationen zu den exakten wasserchemischen und lokalen thermomechanischen Randbedingungen unter diesen Betriebsbedingungen notwendig.

Die BWR VIP 60 SpRK Grenzkurven für das SpRK-Risswachstum unter SWR-Bedingungen (≥ 0.4 ppm O₂, ECP > 0 mVSWE) können sowohl bei kleinen Lastfluktuationen („Ripple Loading“) als auch bei mittleren Temperaturen (200 – 270 °C) für RDB-Stähle, –Schweissgutwerkstoffe und ihre Wärmeeinflusszonen mit einer hohen DSA-Anfälligkeit überschritten werden. Die Grenzkurven sind deshalb auf ihre Gültigkeit bei mittleren Temperaturen und für RDB-Schweissnähte und WEZ, insbesondere bei tieferen Belastungen, hin zu überprüfen. Für den RDB-Grundwerkstoff im stationären SWR-Leistungsbetrieb (T \approx 270 – 290 °C, \approx statische Belastung) und KI-Werte < 60 MPa·m^{1/2} sind die SpRK-Grenzkurven weitgehend konservativ. Für den Speisewasserstutzen (T \approx 220 – 270 °C, kleine Lastfluktuationen nicht ausschliessbar) muss deren Anwendung durch weitere Experimente überprüft werden.

Nach Abschluss der Parametersensitivitätsstudie zur Identifikation kritischer EAC-Bedingungen werden in den Temperaturbereichen maximaler Anfälligkeit weiterführende Experimente unter möglichst betriebsnahen mechanischen und wasserchemischen Bedingungen vorgeschlagen. Die gezielte Festlegung der Versuchsparameter und die Bewertungen der Versuchsergebnisse hin-

sichtlich derer möglichen Auswirkungen auf die Sicherheit des RDB setzen eine möglichst genaue Kenntnis der Systembedingungen unter den für die Risskorrosion kritischen Betriebstransienten voraus.

Der Abschlussbericht des Projekts RIKORR wird im Februar 2003 vorliegen. Zur Behandlung noch offener Fragen ist eine Fortsetzung des Projekts mit einer Laufzeit von 3 Jahren vorgesehen.

FORSCHUNG ZU SCHWEREN UNFÄLLEN [6]: Weltweit sind derzeit 442 Kernkraftwerke in Betrieb. 263 davon arbeiten mit einem Druckwasserreaktor (DWR). Etwa alle zwei Jahre ereignet sich irgendwo ein spontaner Dampferzeugerheizrohrbruch; bisher nie mit gleichzeitigem Kernschmelzen. Ein solcher Fall trägt zwar nach amerikanischen Studien [NUREG/CR-6365] nur mit 4% zu den sehr unwahrscheinlichen Kernschmelzunfällen bei, aber mit 74% zu denen mit Freisetzung der Spaltprodukte direkt aus dem Reaktorkern in die Umgebung (Containment-Bypass). Vorhandene Rückhaltemechanismen konnten bisher für diese Fälle noch nicht quantitativ berücksichtigt werden. Trotz erheblicher Verbesserungen in der Konstruktion, Werkstoffauswahl, Herstellung und Betriebsweise von Dampferzeugern in Druckwasserreaktoren treten weltweit immer wieder Störungen infolge eines Lecks oder sogar Bruchs eines Dampferzeugerheizrohrs auf (SGTR = *Steam Generator Tube Rupture*). SGTR-Abläufen wird seit jeher in Sicherheitsanalysen besondere Beachtung geschenkt. Einzelne Lecks können während des Betriebs entdeckt werden. Sie können bei der nächsten Wartung entweder repariert werden, oder ganze Heizrohre werden verschlossen und ausser Betrieb genommen. Dies resultiert in einer Reduktion der übertragbaren Wärmeleistung und damit der Wirtschaftlichkeit. Deshalb wurden z. B. die Dampferzeuger von *Beznau II* und *I* ausgewechselt. Die neuen Dampferzeugerheizrohre bestehen aus verbessertem, weniger leckanfälligerem Material.

Bei einem oder mehreren SGTR wird durch das Leck Primärkreiswasser, welches unter einem Druck von 160 bar steht, in den sekundären Turbinendampfkreislauf gedrückt, wo es sofort verdampft, da der sekundäre Teil der Dampferzeuger im Normalbetrieb nur unter einem Druck von 70 bar steht. Druck und Temperatur steigen dort wegen der Leckage an. Wenn der Druck 80 bar erreicht, wird die Dampfströmung zum Schutz der Turbinen in Umgehungsrohre umgeleitet. Der Frischdampfüberdruck wird über Abblasestationen direkt in die freie Atmosphäre entlastet. Wenn – durch den SGTR bedingt oder unabhängig davon auf Grund anderer Systemaus-

fälle – gleichzeitig der Reaktorkern schmilzt, dann werden Gase sowie radioaktive und nicht radioaktive Partikeln aus dem Druckbehälter freigesetzt. Mit der Dampfströmung gelangen sie nicht in den Sicherheitsbehälter, wo sie zurückgehalten werden könnten, sondern durch das Heizrohrleck in den Sekundärteil des Dampferzeugers. Falls die Notspeisewasserkühlung in Betrieb genommen wurde, kann Wasser im Sekundärteil des Dampferzeugers stehen, durch den der Dampfstrom dann mit den Gasen und Partikeln strömt. Der obere sekundäre Dampferzeugerteil ist in jedem Fall trocken. Der Freisetzungsstrom führt aussen zwischen den Rohrbündeln mit seinen grossen Oberflächen vorbei, gelangt in den Tropfenabscheider, wo er bestimmungsgemäss verwirbelt wird, dann durch den Dampftrockner mit seinen abrupten Umlenkungen und seinen grossen Plattenoberflächen am oberen Ende des Dampferzeugers und schliesslich über die Abblasestation in die Umgebung. Überall auf diesem Weg ist ein Auswaschen und Ablagern von Partikeln und von in Tröpfchen gelösten Spaltprodukten auf Grund der Erfahrungen zu erwarten.

Bis heute gibt es noch keine experimentelle Datenbasis zur Validierung von Rechenprogrammen, mit denen man das Aerosolverhalten in so komplexer Geometrie und bei so unterschiedlichen Strömungs- und Temperaturverhältnissen verlässlich bestimmen könnte. In Sicherheitsanalysen wird daher konservativ von keiner oder nur geringer Rückhaltung radioaktiver Partikeln und Gase im Dampferzeuger ausgegangen.

Zur Reduzierung der Unsicherheiten im Falle eines SGTR mit Kernschmelzunfall hat das PSI das Forschungsprogramm *ARTIST* (*Aerosol Trapping in a Steam Generator*) initiiert. Ziel der experimentellen Untersuchungen ist die Bereitstellung von Messdaten und die physikalische Interpretation der Rückhaltung von Spaltprodukten in Form von Aerosolpartikeln und Tropfen in den verschiedenen Komponenten eines Dampferzeugers unter prototypischen Randbedingungen, verschiedenen Heizrohrbruchlagen und Leckgeometrien. Das Projekt hat bei Forschungsinstitutionen, Aufsichtsbehörden und Kraftwerksbetreibern weltweit ausserordentliches Interesse hervorgerufen. In den letzten beiden Jahren konnte vom PSI/NES ein Konsortium etabliert werden, an dem sich bisher 11 Organisationen aus Europa, Japan und den USA als Partner beteiligen. Das *ARTIST*-Programm wird im Januar 2003 beginnen und bis Ende 2007 dauern. Ende September 2002 haben sich die bisher eingeschriebenen Partner am PSI getroffen, um die erste Phase des Projekts zu diskutieren und sie offiziell zu starten. Gemeinsames

Ziel des Konsortiums ist es, die zahlreichen offenen Fragestellungen zu klären und die Ergebnisse zur Entwicklung von physikalischen Modellen und zur Validierung von Rechencodes für Sicherheitsanalysen zu verwenden. Schliesslich sollen die Erkenntnisse zu realistischeren Risikoaussagen und zur Entwicklung, Überprüfung und Verbesserungen von Notfallmassnahmen und Richtlinien zur Unfallbeherrschung bei SGTR-Ereignissen führen.

Internationale Partner:

KKB (CH)
NOK Kernkraftwerk Beznau
KKG (CH)
 Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG
HSK (CH) ●
 Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
US-NRC (USA) ●
 U.S. Nuclear Regulatory Commission
AVN (B)
 Association Vinçotte Nuclear
IRSN (F) ●
 Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire
NUPEC (JP)
 Nuclear Power Engineering Corporation
HSE (GB) ●
 Health and Safety Executive Nuclear Safety Directorate
CSN (ES) ●
 Consejo de Seguridad Nuclear
SKI (S) ●
 Statens Kärnkraftinspektion
Ringhals AB (S)
 Ringhals Nuclear Power Plant

Potentielle Partner:

VTT (FN) ●
 Technical Research Center of Finland
EDF (F)
 Electricité de France
Framatome ANP (D)
 Framatome Advanced Nuclear Power
GRS (D) ●
 Gesellschaft für Reaktorsicherheit
TECHNATOME (F)

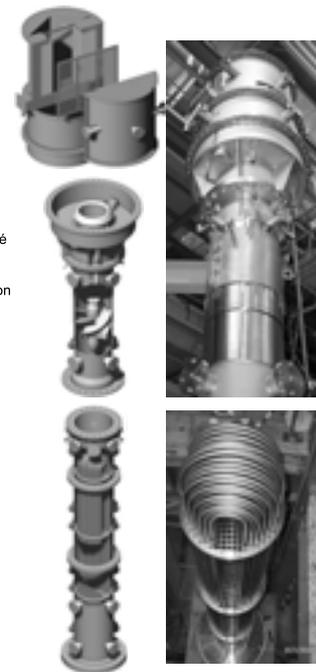


Fig. 5: Ein realer Dampferzeuger eines Druckwasser-Reaktors wird in *ARTIST* mit einem Rohrbündel (246 Heizrohre) und je einem prototypischen Tropfenabscheider- und Dampftrockner-Modul simuliert

Die *ARTIST*-Versuchsanlage ist das 14 m hohe Modell eines Druckwasserreaktor-Dampferzeugers, wie er in den Kernkraftwerken Beznau I und II in Betrieb ist. Die Anlage besteht aus einem in der Höhe, der Anzahl von Heizrohren und Länge skalierten Rohrbündel, und jeweils einem Tropfenabscheider- und Dampftrockner-Modul in Originalgrösse. Die Versuche in *ARTIST* werden durch Experimente in mehreren kleineren Teststrecken begleitet, in denen spezielle Einzeleffekte gezielt mit entsprechender komplexer Messtechnik studiert werden können. Eine erste Testserie im Rohrbündel von *ARTIST* wird zur Zeit im Rahmen des EU-Projekts *SGTR* durchgeführt. Die bisher bestimmten Rückhaltefaktoren sind sehr hoch.

ENTSORGUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE [7]: PSI/NES führt über sein Labor für Endlagersicherheit ein F+E-Programm durch zur Verstärkung der

wissenschaftlichen Basis für die Entsorgung radioaktiver Abfälle. Es erfüllt eine wichtige nationale Rolle, da es den Bund und die NAGRA in deren Aufgabe unterstützt, Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung sowie aus Kernkraftwerken sicher zu entsorgen. Die Kompetenzen des Labors liegen auf den Gebieten der Grundlagen der Endlagerchemie, der Chemie und Physik von Radionukliden an Grenzschichten von Lagermaterialien und Gesteinen und des Radionuklidtransports und der Rückhalte-mechanismen in geologischen Medien und künstlichen Barrieren. Die durchgeführten Arbeiten sind eine Kombination von experimentellen Untersuchungen in radioaktiven Laboratorien und im Feld, von theoretischen Modellentwicklungen und Modellvalidierungen. Die Arbeiten werden im Hinblick auf die Schweizer Tiefenlagerprojekte durchgeführt, und die Resultate finden ihre Anwendungen in den umfassenden Sicherheitsanalysen der NAGRA, welche den Hauptteil der externen finanziellen Unterstützung erbringt. Der Sachlage entsprechend handelt es sich um ein langfristiges Vorhaben, dessen Zeitskala sich aus den Terminplänen der Schweizer Tiefenlagerprojekte ableitet. Die Arbeiten sind eingebunden in internationale Kooperationen. Eine Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse auf Probleme der Lagerung nichtradioaktiver toxischer Abfallstoffe ist zwar im Prinzip möglich, wird jedoch aus verschiedenen Gründen als nicht zweckdienlich angesehen.

Aus den Untersuchungen zur Wechselwirkung von Radionukliden an Grenzflächen hat sich das Projekt entwickelt, an der Schweizerischen Lichtquelle (SLS) des PSI eine MicroXAS (Röntgenabsorptions-Spektroskopie)-Strahllinie zu bauen. Die Auslegungsarbeiten zu dieser Strahllinie sind abgeschlossen. Der Betrieb für Benutzer ist für 2004 vorgesehen.

Im Jahr 2002 konzentrierten sich die Arbeiten auf den Abschluss der Beiträge zum Entsorgungsnachweis der NAGRA im Opalinus-Ton des Zürcher Weinlandes. In dieser Studie geht es um die langfristige Sicherheit eines Endlagers für abgebrannten Brennstoff, verglasten hochaktiven Abfall und langlebigen mittelaktiven Abfall; sie wurde der schweizerischen Genehmigungsbehörde im Dezember 2002 übergeben. Die Bestimmung der Löslichkeiten und der Sorptions-Verteilungskonstanten relevanter radioaktiver Elemente stellt für die Arbeit vieler Jahre einen bedeutenden Meilenstein dar. Er ist ein gutes Beispiel dafür, wie sich der Fortschritt im Verständnis von Mechanismen auf die Beurteilung des Endlagerverhaltens auswirken kann: die Konservativitäten, die in früheren Abschätzungen notwendig waren, konnten deutlich reduziert werden. **Fig. 6** zeigt die Verteilungskonstanten für Sorption am Bentonit-Verfüllmaterial MX-80, welches hauptsächlich aus Montmorillonit besteht. Für die meisten Elemente sind die Verteilungskonstanten jetzt viel grösser anzunehmen.

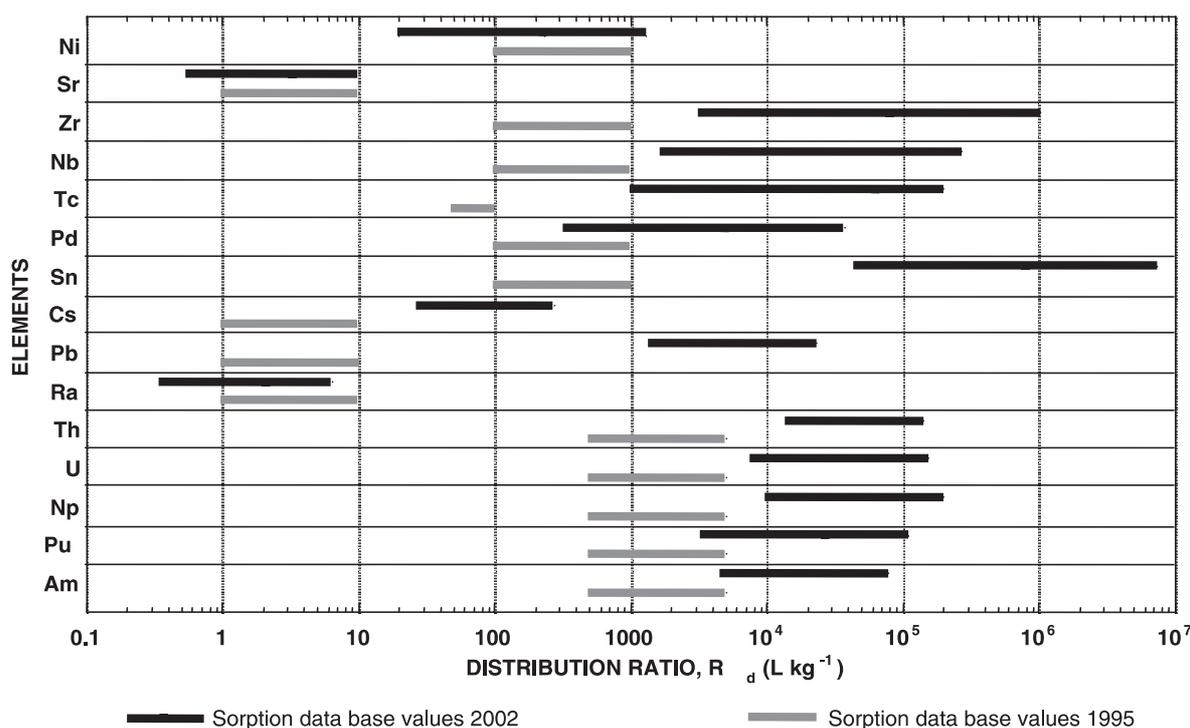


Fig. 6: Sorptions-Verteilungskonstanten in Bentonit MX-80 (Montmorillonit) für sicherheitsrelevante Elemente

Das bedeutet, dass ihre Mobilität viel geringer ist gegenüber den Voraussagen in früheren Studien. Zum Vergleich sind die Werte aus der Studie *Kristallin-1* aus dem Jahr 1995 eingetragen. Zusätzlich war es jetzt möglich, Erwartungswerte und Unsicherheitsbereiche anzugeben. Früher hatte man etwas subjektiv sogenannte optimistische und pessimistische Werte angegeben. Die Verringerung der vorausgesagten Mobilität ergibt sich aus dem kombinierten Effekt eines besseren Verständnisses der Sorptionsmechanismen, neuer Ergebnisse aus eigenen Messungen und aus der Literatur und einer neuartigen Methode, Sorptionsdaten in kompaktiertem Ton aus Messungen in verdünnten Systemen zu gewinnen. Einige der Sorptions-Verteilungskonstanten konnten durch unabhängige dynamische Diffusionsexperimente bestätigt werden. Die weiteren Arbeiten werden darin bestehen, die Basis bestätigter Daten auszuweiten und die Unsicherheiten weiter zu reduzieren. Dazu braucht es ein tieferes Verständnis von kompaktierten Tonsystemen.

SICHERHEITSBEZOGENE MERKMALE ZUKÜNFTIGER REAKTORKONZEPTE

FORTGESCHRITTENE BRENNSTOFFZYKLEN

[8]: Nach der Erneuerung der Hotlabors konnten im Jahr 2002 die experimentellen Arbeiten zur Evaluation von Brennstofftypen mit grösserem Potential zur ferngesteuerten Herstellung wieder aufgenommen werden. Tests zur Fabrikation von Brennstoff (MOX mit 20% Pu) wurden für das *FUJI* Projekt, das aus einer Zusammenarbeit zwischen dem *Japan Nuclear Cycle Development Institute*, dem *PSI* und der *Nuclear Research and Consultancy Group* besteht, mit höchster Priorität durchgeführt. Brennstoff wurde in verschiedenen Formen hergestellt: als Tabletten (Pellets), als Mikrokugeln und als *Vipac* Partikeln. Beim *Vipacverfahren* wird gesintertes Granulat in Hüllrohre eingefüllt und dann durch Vibrieren verfestigt. Die Pelletherstellung wurde erfolgreich abgeschlossen. Dazu gehörte auch das Bestimmen der richtigen Sinterbedingungen, um das niedrige Sauerstoff/Metall Verhältnis von 1.97 einstellen zu können, wie es für Brennstoff für Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum typisch ist. Zusätzlich konnte auch Ende 2002 der Pelletbrennstoff für Bestrahlungsversuche hergestellt werden. Die Herstellungstests für *Vipac* Partikeln konnten ebenfalls abgeschlossen werden. *PSI* hat zum ersten Mal *Vipac* Partikeln mit einer neuen Fabrikationslinie hergestellt, die mit dem Pressen der Tabletten beginnt. Dann werden die grünen Pellets gebrochen und das Granulat wird gesintert. **Fig. 7** zeigt die zufriedenstellenden Formen des Granulats, welches auf diese Weise erzeugt

wurde. Die Herstellung von *Vipac* Brennstoff zur Bestrahlung wird im Januar 2003 begonnen. Die Tests zum Füllen von Hüllrohrsegmenten mit Mikrokugeln und mit *Vipac* Partikeln verliefen erfolgreich. Während die Abfüllprozedur mit Mikrokugeln wegen der Erfahrungen des *PSI* keine Schwierigkeiten bereitete, gelang das Abfüllen von *Vipac* Partikeln nicht so leicht und führte zu der Erkenntnis, dass das homogene Füllen des Hüllrohrs mit Granulaten aus verschiedenen Grössenfraktionen «der springende Punkt» ist. Eine gleitende Frequenzänderung während der Vibrationsverfestigung ist nützlich, aber die Resonanzfrequenz des Systems sollte vermieden werden, weil dabei eine schnelle und unkontrollierbare Kompaktion eintritt. Zufriedenstellende

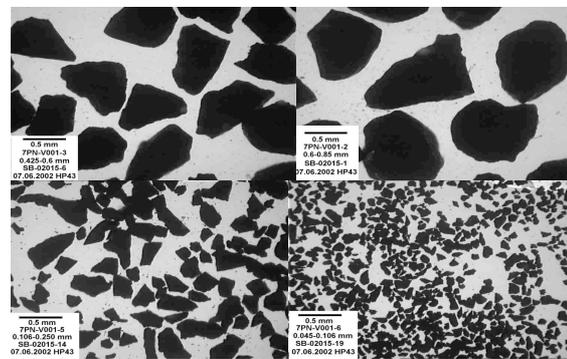


Fig. 7: Im *PSI* hergestellte MOX-*Vipac*-Partikeln in verschiedenen Grössenfraktionen

Ergebnisse erzielt man erst bei genügend grosser Beschleunigung und Leistung. Schliesslich wurde im Dezember 2002 das Geliervverfahren für die Herstellung der Mikrokugeln wieder aufgenommen, nachdem Schwierigkeiten mit Uranauswaschungen durch ein neues Reinigungsmittel aufgetreten waren.

ALPHA [9]: Die nächste Generation fortgeschrittener Leichtwasserreaktoren nutzt bei angenommenen Störfällen verstärkt passive Systeme zur Abfuhr der Nachzerfallswärme aus dem Reaktor und seinem Primärkreislauf und aus dem Sicherheitsbehälter. Passive Kondensatoren übertragen die Wärme aus dem Sicherheitsbehälter in einen ausserhalb gelegenen Wasserbehälter, in welchem der Dampf kondensiert. Im Rahmen des *Alpha*-Projektes sind bereits eine Reihe passiver Kühlsysteme mit ihren unterschiedlichen Komponenten sowohl experimentell als auch theoretisch untersucht worden. Insbesondere wurde das Funktionieren der grossmassstäblichen passiven Kühlsysteme in der Versuchsanlage *PANDA* demonstriert. Die meisten dieser Untersuchungen bezogen sich auf angenommene Auslegungs-

störfälle für Kühlmittelverlust und die dabei auftretenden physikalischen Phänomene. Bei den zahlreichen analytischen Arbeiten zeigten sich Schwächen der Rechencodes zur Vorausbestimmung des Systemverhaltens für Situationen, in denen nicht homogene Gasverteilungen eine wichtige Rolle spielen. Besonders war das der Fall bei angenommenen schweren Unfällen, bei denen leichter nicht kondensierbarer Wasserstoff freigesetzt und verteilt wird. Für eine genauere Vorausberechnung des Systemverhaltens in solchen Situationen muss man verschiedene Phänomene wie Gas- und Dampfstrahlen oder umherziehende Schwaden mathematisch dreidimensional behandeln.

Im Projekt *TEMPEST* des 5. Rahmenprogramms der EU wurde das Verhalten des passiven Kühlsystems für den Sicherheitsbehälter des *ESBWR* (European Simplified Boiling Water Reactor) in der Grossversuchsanlage *PANDA* experimentell untersucht. Hauptaugenmerk galt dem Einfluss nichtkondensierbarer Gase, insbesondere Wasserstoff, der durch Helium simuliert wurde, auf das Systemverhalten. Zusätzlich wurde die Wirkung einer neuartigen Einrichtung zur Störfallbeherrschung (*DGRS* = Drywell Gas Recirculation System) auf das Langzeitverhalten des Sicherheitsbehälters studiert. Das *DGRS* ist im wesentlichen ein Ventilator, der verhindert, dass die nichtkondensierbaren Gase aus dem passiven Kühlsystem durch die Wasservorlage in den Gasraum des Druckunterdrückungssystems strömen, wo sie zum Druckaufbau führen würden, sondern dass sie zurück in den Sicherheitsbehälter gefördert werden. Das übergeordnete Ziel der vier Experimente mit der Injektion grosser Mengen Heliums bestand darin, die relevanten Phänomene detailliert zu untersuchen und Daten zur Verfügung zu stellen, mit denen die Fähigkeiten fortschrittlicher Containmentcodes und *CFD-Codes* (Computational Fluid Dynamic), das Verhalten

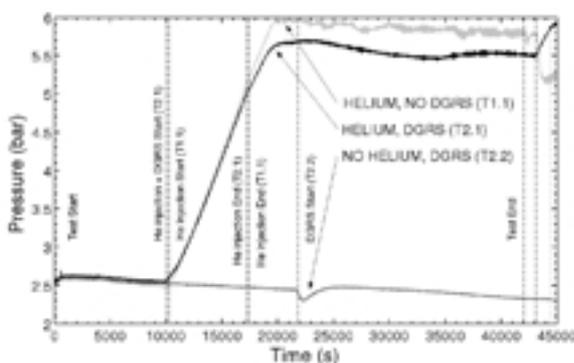


Fig. 8: Containmentdruck beim Auslegungstörfall (T2.2) und bei schweren Unfällen (T1.1 und T2.1) mit und ohne *DGRS*

des Sicherheitsbehälters unter solchen Unfallbedingungen vorzuberechnen, geprüft werden können. Dementsprechend wurde die ohnehin schon umfangreiche Instrumentierung von *PANDA* noch erweitert, um die räumliche Auflösung von Temperaturmessungen im Sicherheitsbehälter zu verbessern. Eine andere Erweiterung der Messmöglichkeiten bestand in der Installation eines Systems zur Bestimmung der Gaskonzentrationen. Durch Kapillarröhrchen wird Gas kontinuierlich an verschiedenen Stellen in der Anlage zu einem Massenspektrometer abgesaugt, das auf diese Weise die molaren Gasfraktionen (Luft, Helium, Dampf) an jedem Messort in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt.

Fig. 8 zeigt den Druck im Sicherheitsbehälter bei drei verschiedenen Experimenten aber mit fester Konfiguration der *PANDA*-Anlage. Test T2.2 stellt die Simulation des Auslegungstörfalls dar (Bruch der Hauptdampfleitung). Nach etwa 22'000 Sekunden setzte die Wirkung des *DGRS* ein. In den Tests T1.1 und T2.1 wurde zusätzlich eine Überhitzung des Reaktorkerns simuliert, indem nach 10'000 Sekunden 2 Stunden lang grosse Heliummengen injiziert wurden. Deutlich erkennbar sind der schnelle Druckanstieg durch die Heliumeinspeisung und die Druckstabilisierung 3'000 Sekunden nach Ende der Einspeisung. Man sieht nur einen sehr kleinen Einfluss des *DGRS* auf das Systemverhalten. Während des Versuchs T2.1 verblieb etwas Helium im Sicherheitsbehälter, was im Vergleich zu Versuch T1.1 zu einer Druckabsenkung um 0.3 bar führte. Mit Hilfe der verbesserten Instrumentierung konnte ein klares Bild von der Gasverteilung, von Mischungs- und Schichtungsvorgängen einschliesslich des Fortschreitens der Schichtungsfront und von verwandten Phänomenen gezeichnet werden. Die experimentellen Resultate werden derzeit für die Beurteilung von Rechencodes genutzt.

GANZHEITLICHE BETRACHTUNG VON ENERGIESYSTEMEN GaBE [10]: Alle Aktivitäten im Rahmen des *China Energy Technology Program (CETP)* wurden im Jahr 2002 abgeschlossen. Im letzten Jahr des Projekts hat das *GaBE*-Team, unterstützt von Forschungspartnern, eine umfassende Software entwickelt, die Entscheidungsträgern und einer Vielzahl anderer Benutzer (Ingenieure, Umweltexperten, Akademiker) einen flexiblen Zugang zu *CETP*-Ergebnissen und Einsichten ermöglicht. Das schliesst auch fortschrittliche analytische Optionen zur Untersuchung spezieller Fragestellungen ein. Das gesamte Softwarepaket befindet sich auf einer DVD (Digital Versatile Disk). Sie enthält einen Film über *CETP*, Hintergrundinformationen zum Projekt und über China,

Kernaussagen zu individuellen Themen, Informationen über Methoden, Daten und Resultate. Ferner enthält sie interaktive Werkzeuge für die gezielte Suche nach Ergebnissen von technischen Fragestellungen. Auch finden sich Hilfen für die Entscheidungsfindung. Die Information ist hierarchisch gegliedert. Das erlaubt dem Benutzer die Wahl des Detaillierungsgrades der Informationen, der seinem Hintergrund und seinen Interessen am besten entspricht.

Die Darstellung einiger Themen bietet besondere Möglichkeiten, wozu auch erweiterte analytische Bearbeitungen zählen. Für die Darstellungen zur Beurteilung der Umwelteinflüsse (*Environmental Impact Assessment = EIA*) wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem man interaktiv für eine Reihe von Kraftwerkstandorten Gesundheits- und Umwelteinflüsse simulieren und die damit zusammenhängenden externen Kosten abschätzen kann. Für jeden Standort kann der Benutzer verschiedene Technologien zur Elektrizitätserzeugung auswählen. Er kann Grundannahmen über

die Kraftwerkscharakteristiken und zum Grad der Vermeidung von luftverschmutzenden Emissionen einführen. Auf einem parametrischen Modell basierend, können Schäden durch Luftverschmutzung in Sekundenschnelle abgeschätzt werden, während eine volle Simulation mehrere Stunden in Anspruch nimmt.

Das Modul für die Entscheidungshilfe auf multikriterieller Basis erzeugt und präsentiert Rangfolgen von Optionen in einer interaktiven graphischen Form. Aggregierte Resultate aus *CETP* für eine Folge von Kriterien werden mit der Eingabe des Benutzers von Gewichtungen der Kriterien kombiniert. Dadurch wird eine Rangfolge von einzelnen Technologien oder von Kombinationen individueller Technologien erzeugt. Der Benutzer kann die bestmöglichen Optionen herausfinden, die durch die Präferenzen verschiedener Stakeholder bedingt werden. Die jeweiligen Präferenzen basieren wiederum auf den wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Perspektiven der Stakeholder.

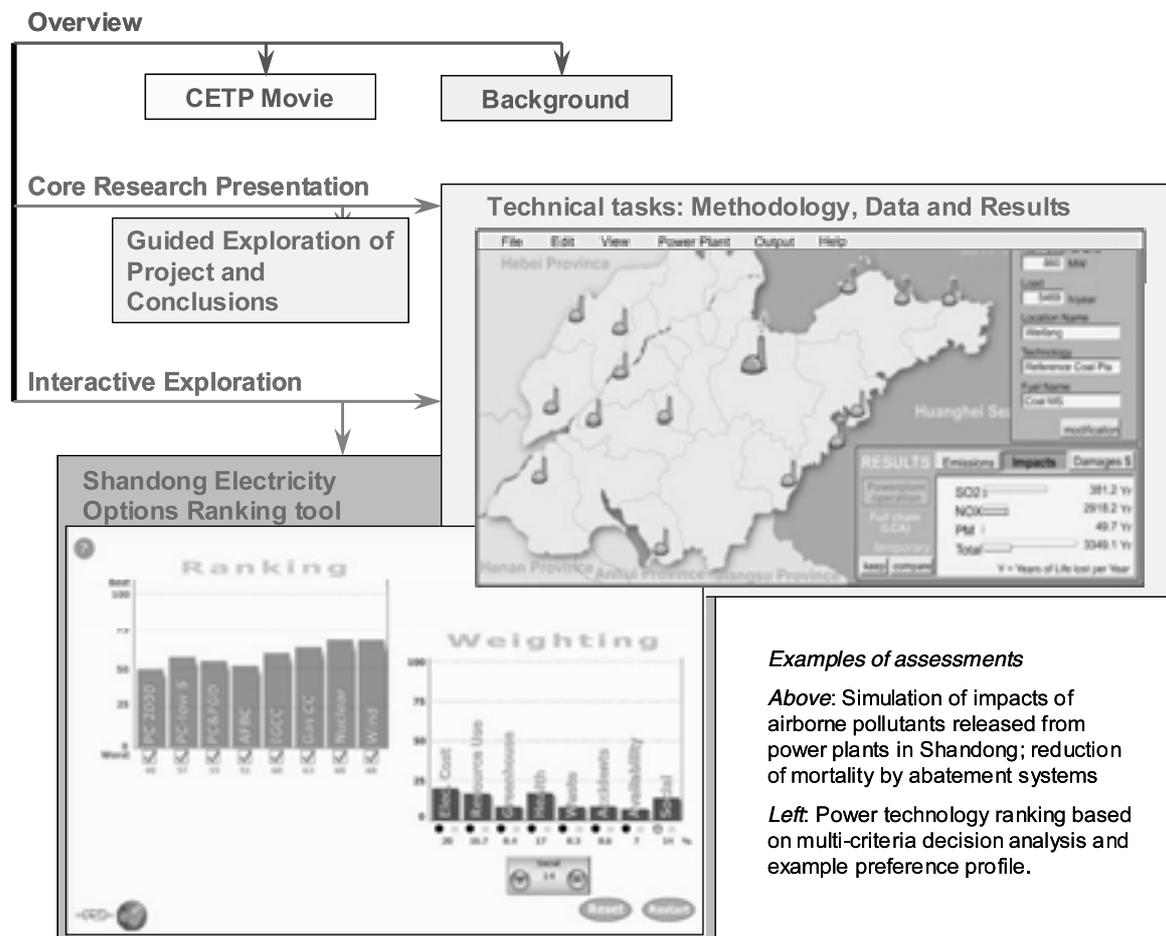


Fig. 9: Inhalte der CETP DVD nach Detaillierungsgrad und Interaktion

Internationale Zusammenarbeit

- **HRA:** OECD/NEA/CSNI, GRS(DE).
- **STARS:** 5th EU-FP, Purdue Univ.(US), Univ. of Illinois(US), EPRI(US), GRS(DE).
- **LWR-PROTEUS:** 5th EU-FP, CEA(FR), Westinghouse-Atom(SE), Framatome-ANP(FR/DE).
- **EDEN:** 5th EU-FP, Westinghouse-Atom(SE), EPRI/NFIR(US), Framatome-ANP(FR/DE), COGEMA(FR), CEA(FR), IPSN(FR).
- **Bauteilsicherheit:** 5th EU-FP, FZK(DE), MPA(DE), Framatome-ANP(FR/DE), IAEA, VTT(FI), CEA(FR).
- **Forschung zu schweren Unfällen:** 5th EU-FP, USNRC(US), Framatome-ANP(FR/DE), CEA(FR), AEA Technology(GB), FZK(DE), GRS(DE).
- **Entsorgung radioaktiver Abfälle:** 5th EU-FP, FZK(DE), FZR(DE), CEA(FR), CRIEPI(JP), JNC(JP), SKB(SE), NIREX(GB).
- **Fortgeschrittene Brennstoffzyklen:** 5th EU-FP, CEA(FR), JAERI(JP), JNC(JP), OECD/NSC und OECD/Halden(NO), NRG(NL).
- **ALPHA:** 5th EU-FP, USNRC(US), EPRI(US), GE(US), Framatome-ANP(FR/DE), OECD / NEA / CSNI.
- **GaBE:** 5th EU-FP, OECD/NEA und OECD/IEA, IAEA, ABB-CETP(CH), MIT(US); Univ. of Tokio(JP).

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Im Programm *LWR-PROTEUS* wurden erste Messungen mit hochaktiven Proben (Hochabbrand Brennstoff) erfolgreich durchgeführt. Der Verlauf der abnehmenden Reaktivität mit zunehmendem Abbrand konnte bestimmt werden. On-Call Rechnungen im Rahmen von *STARS* wurden benutzt, um das Speisewasser-System des Kernkraftwerks *Leibstadt* zu modifizieren; bei einem Turbinenschnellschluss haben sich die Änderungen als richtig und zweckmässig herausgestellt. Im Jahr 2002 wurde ein internationales Konsortium gegründet, das die *ARTIST*-Experimente zum Aerosolverhalten beim Bruch von Dampferzeuger-Heizrohren begleiten wird. Erste Experimente zeigten, dass mit einem hohen Rückhaltefaktor von Aerosolpartikeln gerechnet werden kann. Der Beitrag zum *China Energy Technology Program* ist abgeschlossen. Es zeigten sich deutlich niedrigere Gesamtkosten (einschliesslich der externen Kosten) wenn «clean coal» Technologien eingesetzt werden. 27 Aufforderungen zur Teilnahme an *Integrierten Projekten* oder *Excellence-Netzwerken* im 6. EU-Rahmenprogramm liegen vor. Dies bedeutet für das Jahr 2003 und die folgenden Jahre ein gleichbleibendes Engagement im Rahmen der Zusammenarbeit zur Nutzung der Kernenergie in Europa.

Das *PSI* stimmt den in der *GIF*-Charta formulierten Zielen (more sustainable fuel cycle, increased safety, economics and proliferation resistance) zu, wobei es seine eigenen Beiträge auf Reduzierung der Abfallmengen - insbesondere der extrem langlebigen Nuklide - bei weiterer Erhöhung der

Anlagensicherheit konzentrieren wird. Massnahmen dazu sind einerseits Erhöhung des Abbrandes und Aktinidentransmutation und andererseits Stärkung innewohnender Sicherheitseigenschaften und passiver Systeme. Die gewonnenen Kenntnisse sind auch für heutige Kernkraftwerke und zur Lösung von Entsorgungsfragen von Nutzen. Das *PSI* fühlt sich verpflichtet, das, was sich im Bereich der Kernenergie und ihrer Weiterentwicklung international tut, aktiv zu verfolgen und zur Förderung des Nachwuchses in diesem Bereich beizutragen; dies kann nur über Beteiligung an attraktiver internationaler Forschung geschehen. *GIF* bietet dazu eine hervorragende (kosteneffiziente) Möglichkeit, wobei die Forschungskooperation mit Frankreich (als einem der wichtigsten der 10 Vollmitgliedsländer) besonders gesucht wird. *GIF* wird für die Vergabe von Forschungsprojekten im Rahmen der EU eine grosse Rolle spielen, was die Chancen der Schweiz auf Mitteleinwerbung zu erhöhen hilft. Das *PSI* richtet seine Beteiligung aus an seinen (finanziellen) Möglichkeiten, an der Nutzung von Vorhandenem, an Kompatibilität mit bestehenden Forschungsprogrammen und Verpflichtungen (vor allem gegenüber den Kernkraftwerkbetreibern und der *HSK* im nuklearen Forschungsbereich) sowie am wissenschaftlichen Reiz möglicher Projekte innerhalb seiner Forschungsschwerpunkte; es tritt nicht für die Entwicklung eines bestimmten (favorisierten) Anlagenkonzeptes ein und orientiert sich vielmehr an möglichen konzeptübergreifenden Arbeiten.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

Die Jahresberichte werden auch im Scientific Report 2002 Volume IV des PSI erscheinen

(zu bestellen bei: PSI, CH-5332 Villigen, oder <http://nes.web.psi.ch>).

- [1] M. A. Zimmermann, (martin.zimmermann@psi.ch), PSI, Villigen, **STARS**, <http://stars.web.psi.ch>,
- [2] V. N. Dang (vinh.dang@psi.ch), PSI, Villigen, **Human Reliability Analysis (HRA), applications and methods development**, <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**, <http://www.web.psi.ch/edenO.htm>
- [5] D. Kalkhof, M. Grosse, M. Niffenegger, B. Tirbonod, (dietmar.kalkhof@psi.ch), PSI, Villigen, **FEWER**, <http://www.web.psi.ch/lwv.htm> , (JB)
H.P. Seifert, S. Ritter, U. Ineichen, U. Tschanz, B. Gerodetti (hans-peter.seifert@psi.ch), PSI, Villigen, **RIKORR**, <http://www.web.psi.ch/lwv.htm>, (SB)
- [6] S. Güntay, (salih.guentay@psi.ch) PSI, Villigen, **Forschung zu schweren Unfällen**, <http://www.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**, <http://www.web.psi.ch/afcpj.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)

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Damit die bestehenden Kernanlagen während ihrer verbleibenden Betriebslaufzeiten weiterhin unter Gewährleistung höchster Sicherheitsstandards betrieben werden können, müssen Sicherheitstechnik und Sicherheitskultur, aber auch die behördlichen Aufsichtsmethoden entsprechend dem Fortschritt von Wissenschaft und Technik weiterentwickelt werden. Mit ihren unabhängigen Forschungsvorhaben im Rahmen der Regulatorischen Sicherheitsforschung, verschafft sich die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) wissenschaftlich fundierte Grundlagen für ihre Überprüfungen und Entscheide. So tragen die gewonnenen Erkenntnisse dazu bei, Verfahren und Richtlinien zu verbessern, potentielle sicherheitstechnische Probleme frühzeitig zu erkennen und technologische Innovationen in die Praxis umzusetzen.

Angesichts des begrenzten Budgets für die Regulatorische Sicherheitsforschung ist eine sorgfältige und vorausschauende Priorisierung der nationalen Forschungsthemen unumgänglich. Als kleines Land nutzt die Schweiz zudem die Vorteile von internationalen Forschungs Kooperationen. Diese tragen zur Konsolidierung und Verbreiterung der Wissensbasis bei, ermöglichen die Abstimmung von Forschungsprioritäten und die einvernehmliche Interpretation von Resultaten.

Die Regulatorische Sicherheitsforschung konzentrierte sich im Jahr 2002 auf Projekte in den folgenden Bereichen:

Materialforschung: Das Alterungsverhalten von Werkstoffen und die damit verbundene Beeinträchtigung der Strukturintegrität von Komponenten und Systemen gewinnen mit zunehmender Betriebsdauer der Anlagen an Bedeutung. Zerstörungsfreie Diagnose- und Analyseverfahren spielen bei der kontinuierlichen Überwachung des Materialzustandes eine wichtige Rolle und erlauben, präventive Massnahmen zur Erhöhung der Anlagensicherheit zu ergreifen. Weiterführende Kenntnisse zu den verschiedenen Faktoren, welche die Materialermüdung beeinflussen (mechanische, thermische, chemische Belastungen sowie Strahlenbelastungen) sind unumgänglich für die Erweiterung der technischen Basis für regulatorische Entscheide.

Stör- und Unfallforschung: Für die sicherheitstechnische Überprüfung und die weitere

Verbesserung der Prävention, sind sowohl Grundlagenwissen als auch entsprechende Simulationsprogramme zum Verhalten des Reaktorkerns und der Kühlkreisläufe bei Stör- und Unfällen erforderlich. Dabei müssen neue Entwicklungen im Bereich der Anlagentechnik und der Brennstoffe sowie die verschiedenen Betriebsfahrweisen berücksichtigt werden (z.B. Hochabbrand, Verhalten von Mischoxid- und Inertmatrixbrennstoff, thermohydraulisches Verhalten bei Transienten, digitale Leitsysteme, etc.). Die wissenschaftliche Untersuchung der Abläufe und Phänomene von Stör- und Unfällen bilden die Voraussetzung für die Bewertung der Wirksamkeit von Sicherheitsreserven und Präventionsmassnahmen und ermöglichen, die Auswirkungen von Stör- und Unfällen zu vermindern.

Human Factors: Die Human Factors Forschung stellt den Menschen in den Mittelpunkt und untersucht seine Interaktionen mit Systemen und mit seiner Arbeitsumgebung. Die Forschungsergebnisse bilden die wissenschaftliche Basis für die Beurteilung von Betriebsabläufen, der Notfallorganisation und der Methoden der Aus- und Weiterbildung in den Werken oder der Auswirkungen des Automationsgrads auf die Operateure. Ziel ist, den Beitrag der menschlichen Leistung im Normalbetrieb und bei Ereignissen bewerten zu können und menschliche Fehlhandlungen zu verhindern bzw. deren Auswirkungen zu minimieren.

Strahlenschutz- und Notfallschutzforschung: Dieser Forschungsbereich befasst sich mit der Messung und Analyse der Strahlenexposition des Menschen, mit biologischen und medizinischen Strahlenauswirkungen sowie mit der Strahlenschutztechnik. In den Projekten werden Verfahren entwickelt, welche die Präzision von Aktivitätsmessungen in Luft, Wasser, Boden, Körperflüssigkeiten und -ausscheidungen verbessern und die sichere messtechnische Erfassung von radioaktiven Kontaminationen von Oberflächen ermöglichen. Damit können die Aussagen zu Exposition und Ausbreitung verfeinert und die entsprechenden Notschutzmassnahmen weiterentwickelt werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

MATERIALFORSCHUNG

RIKORR - Risskorrosion in druckführenden ferritischen Komponenten des Primärkreislaufes von Siedewasserreaktoren [1]

Für die Sicherheit von Kernkraftwerken ist die Kenntnis der Alterungsphänomene und die Ausnutzung der technischen Lebensdauer der Komponenten und Systeme von zentraler Bedeutung. Durch Umgebungseinflüsse während des Betriebes kann es zu Veränderungen der Werkstoffeigenschaften d.h. zur Alterung kommen. Die Strukturintegrität des Reaktordruckbehälters (RDB) als eine der primären Sicherheitshüllen gegen die Freisetzung von radioaktiven Stoffen beeinflusst massgeblich die Sicherheit und Lebensdauer von Leichtwasserreaktoren. Die Risskorrosion ist neben Ermüdung und Strahlenversprödung ein wichtiger Alterungsmechanismus des RDB. Im Rahmen dieses Projektes wird das Risskorrosionsverhalten von ferritischen RDB-Stählen unter stationären und transienten Siedewasserreaktor-Betriebsbedingungen untersucht. Es sollen Risswachstumsraten für die dehnungsinduzierte Risskorrosion ermittelt werden, welche für die Bewertung der Sicherheit und Strukturintegrität und für die Definition von gezielten Präventions- und Gegenmassnahmen verwendet werden können. Neben verschiedenen RDB-Stählen mit unterschiedlichen Schwefel- und Aluminium-Gehalten wird dabei auch das Risskorrosionsverhalten der Umfangsschweissnaht eines nicht eingesetzten RDB und der Wärmeinflusszone (WEZ) untersucht. Mittels einer Parametersensitivitätsstudie sollen zudem kritische Komponenten und Betriebszustände identifiziert werden, die durch die geltenden Regelwerke zur Ermüdungsauslegung und -überwachung nicht konservativ abgedeckt sind.

Die Zielsetzungen des Berichtsjahres wurden vollumfänglich erreicht und das Projekt konnte Ende 2002 erfolgreich abgeschlossen werden. In den durchgeführten Versuchen, wurden das Korrosionspotential, der Sulfat-Gehalt und die Temperatur der Umgebung, der Schwefelgehalt des Stahls sowie die Belastungsgeschwindigkeit und -höhe als wesentliche Einflussparameter auf die dehnungsinduzierte Risskorrosion und die Schwingrisskorrosion identifiziert. Bei niederfrequenten, zyklischen Belastungen, welche charakteristisch für Anfahr- und Abfahrvorgänge sowie für spezielle Betriebszustände mit Temperaturschichtungsphänomenen sind, können die Ermüdungsrisswachstums-Grenzkurven des

Regelwerks unter simulierten SWR-Bedingungen sowohl in RDB-Grund- als auch Schweissgutwerkstoffen deutlich überschritten werden. Das Regelwerk ist deshalb im Gegensatz zu hohen Belastungsfrequenzen nicht konservativ. Für genauere Aussagen sind jedoch weitere Experimente bei niedrigerer Belastungshöhe und mit genaueren Informationen zu den wasserchemischen und lokalen thermomechanischen Randbedingungen notwendig. Weitere Grenzkurven müssen zudem auf ihre Gültigkeit für RDB-Schweissnähte und WEZ überprüft werden. Das Nachfolgeprojekt RIKORR II startet im Jahr 2003 mit einer Laufzeit von 3 Jahren.

STÖR- UND UNFALLFORSCHUNG

STARS – Sicherheitsforschung bezüglich Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz [2]

Mit Hilfe des Projektes STARS kann seit mehreren Jahren der Auf- und Ausbau der erforderlichen Expertise für die Durchführung von deterministischen Sicherheitsanalysen zur Überprüfung des Brennstoff- und Anlageverhaltens gewährleistet werden. Daneben stellt das Projekt die notwendigen Rechenprogramme und Modelle bereit und validiert diese. Die Projektarbeiten bilden die Grundlage für die wissenschaftlichen Dienstleistungen des *Paul Scherrer Instituts* für die HSK und für die Kraftwerksbetreiber.

Die in STARS bereits gut etablierten Transientenanalysen mit dreidimensionaler Reaktorkinetik für Druckwasserreaktoren konnten im Berichtsjahr mit der Teilnahme am internationalen Turbinenschnellschluss-Benchmark (organisiert durch *OECD/NSC*) auf die Anwendungen in Siedewasserreaktoren ausgeweitet werden. Das Fachgebiet der Stabilitätsanalyse für Siedewasserreaktoren wurde mit einer Doktorarbeit weiter vertieft. Dabei konnten wichtige Erkenntnisse für die Anwendung der theoretischen Resultate auf die Interpretation der mit den herkömmlichen Rechencodes (*RAMONA*) berechneten Resultate gewonnen werden.

Mit dem *OECD Halden Reactor Project* besteht eine aktive Zusammenarbeit bei der Auslegung und später bei der Analyse des geplanten LOCA-Experiments (IFA-650) mit hochabgebranntem Brennstoff, der von Schweizer Kernkraftwerken zur Verfügung gestellt wird. Mit höher werdenden Abbränden steigen die Innendrucke der hochabgebrannten Brennstäbe. Dies könnte währ-

rend der Druckentlastung eines LOCA (Kühlmitte lverlustunfall) zum Aufblähen des Hüllrohrs und schliesslich zu überhöhten Hüllrohrtemperaturen und Hüllrohrversagen führen. Im Halden-Reaktor sollen hochabgebrannte Brennstab-Proben unter LOCA-ähnlichen und möglichst kontrollierten Bedingungen zum Aufblähen gebracht werden. Das Projekt STARS führte im Jahr 2002 für dieses geplante Experiment parametrische Auslegungsrechnungen mit dem thermohydraulischen Systemprogramm *TRAC-BF1* durch.

Im Berichtsjahr wurde zudem das Dokumentenarchivsystem *STARSBASE* in Betrieb genommen. Darin werden in Zukunft die Dokumentation des Qualitätsmanagementsystems sowie sämtliche vom Projekt STARS erzeugten Dokumente kontrolliert abgelegt und den berechtigten Benutzern zur Verfügung gestellt.

PALEOSEIS - Reconstructing the paleoseismological record in Northern Switzerland [3]

Mittels dieses Projektes konnte im Jahr 2002 erstmals ein Katalog der Starkbeben in der Schweiz im Zeitraum von der Gegenwart bis 10'000 v. Chr. erstellt werden. Die Ergebnisse tragen zu einer verbesserten Quantifizierung der seismischen Gefährdung der Kernanlagen in der Schweiz bei. In den Untersuchungen, welche sich auf die Basel-Region sowie die Innerschweiz in der Umgebung von Luzern konzentrierten, wurden paläoseismologische Arbeitsmethoden auf vier verschiedene geologische Archive angewendet. Im Jahre 2002 waren dies Seeablagerungen, eine aktive Bruchzone (Reinach-Bruch), Felssturzböcke und Höhlen. Für den Reinach-Bruch erfolgte der Nachweis von fünf ko-seismischen Bewegungsereignissen innerhalb der letzten 13'000 Jahre, wobei das jüngste Ereignis mit dem Basel-Erdbeben von 1356 korreliert. Das Basel-Erdbeben konnte ausserdem in drei weiteren geologischen Archiven nachgewiesen werden. So im Dieboldslöchl, einer Höhle im Faltenjura südlich von Basel, anhand von Zerstörungen an den Sinterbildungen, durch Felssturzböcke, von denen die meisten im Zeitraum zwischen 1210 und 1450 n. Chr. niedergingen, sowie anhand von schwachen Deformationsstrukturen im Baldegger See. Die Untersuchungen subaquatischer Rutschmassen und Trübestromablagerungen im Vierwaldstätter See und teilweise im Seelisberger, Lungener und Baldegger See weisen darauf hin, dass die Innerschweiz in den vergangenen 14'000 Jahren von fünf Starkbeben betroffen wurde, wovon das jüngste das historisch überlieferte Unterwaldenbeben von 1601 ist.

PHEBUS Fission Products Programme [4]

Seit 1997 beteiligt sich die Schweiz mit «in-kind» Forschungsbeiträgen am internationalen Programm **PHEBUS FP** (Fission Products). Die Modellierung von schweren Störfällen am Forschungsreaktor PHEBUS des *IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire)* im französischen Cadarache liefert Daten zum Verhalten von Spaltprodukten und ermöglicht dadurch die Weiterentwicklung der Methoden für Sicherheitsanalysen und für das Störfallmanagement von Kernkraftwerken. Die Beiträge der Schweiz durch das *Paul Scherrer Institut*, Bereich Nukleare Energien und Sicherheit, konzentrieren sich auf die Untersuchung der Spaltproduktfreisetzung mittels Nachbestrahlungsanalysen und auf Studien zum Iod-Verhalten.

Im Rahmen des FPT4-PTA Versuchs, bestimmte das Labor für Werkstoffverhalten LWV im Jahr 2002 Spaltprodukte und Brennstoffelemente in Auslauglösungen von Filtern mittels γ - und massenspektrometischer Analysen. Die Experimente wurden durch Transportschwierigkeiten verzögert, so dass die geplanten Nuklidanalysen erst Anfang 2003 abgeschlossen werden können. Für den FPT2-PTA Versuch wurde eine Apparatur für die Auslaugung von Filtern aufgebaut. Die Analysen der Spaltprodukte werden auch hier im Jahre 2003 abgeschlossen.

Das Labor für Thermohydraulik untersuchte den Einfluss der β -Strahlung auf die Stabilität des Silberiodids im Containmentsumpf. Die Resultate werden im Jahr 2003 in einem Meeting mit dem *IRSN* und anlässlich des Phebus-Seminars diskutiert und sollen die Ableitung von Massnahmen zur Verbesserung der Iod-Rückhaltung ermöglichen.



Abbildung: Schematische Darstellung der Auslaugapparatur (Auslösung der im Filter abgeschiedenen Aerosole) in der mit 10 cm Blei abgeschirmten Kapelle.

OECD Halden Reactor Project – Fuels and Materials [5]

Das **OECD Halden Reaktor Projekt** läuft seit dem Jahr 1958 und ist eines der grossen Gemeinschaftsprojekte der *OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development)*. Mit rund 100 Teilnehmern aus 20 Ländern bildet es ein wichtiges, internationales Forschungsnetzwerk. Schwerpunkte des Programms sind Experimente zum Verhalten von Brennstoffen und Materialien unter normalen und transienten Bedingungen sowie Untersuchungen der Leistungsfähigkeit von Menschen bei der Überwachung und Steuerung komplexer Systeme. Ende 2002 wurde das 3-Jahresprogramm 2000 – 2002 erfolgreich abgeschlossen. Das neue Programm für die Jahre 2003 – 2005 wurde plangemäss im Januar 2003 gestartet.

Im Bereich der Brennstoffe und Materialien wird das Verhalten verschiedener Brennstoffe im Normalbetrieb und bei Transienten mit Schwerpunkt auf Hochabbrand untersucht. Im Halden-Reaktor waren im Berichtsjahr mehrere Experimente für die Untersuchung des Betriebsverhaltens von keramischen Brennstoffen (UO_2 , MOX, inert matrix) und Hüllrohrmaterialien installiert. Typische Messgrössen sind dabei Brennstofftemperatur, Spaltgasfreisetzung und Dimensionsänderungen von Brennstoff und Hüllrohr. Im inert matrix Experiment, für welches das Paul Scherrer Institut den Brennstoff produziert hat, wurde eine weitere Leistungserhöhung durchgeführt. Untersuchungen des Spannungsrisskorrosionsverhaltens von im Reaktorkern eingesetzten Strukturmaterialien tragen zur Aufklärung der Fragen zur Lebensdauer von Kernkomponenten bei. Dazu waren im Berichtsjahr 15 Experimente im Halden Reaktor installiert, bei welchen stark vorbestrahlter, reinstrumentierter Brennstoff sowie Materialien mit hohen Neutronen-Fluenzen aus kommerziellen Leichtwasserreaktoren eingesetzt wurden.

HUMAN FACTORS FORSCHUNG

HRA - Human Reliability Analysis [6]

Das Projekt hat zum Ziel, Methoden für die Analyse von menschlichen Faktoren in probabilistischen Sicherheitsbewertungen zu entwickeln und so die Sicherheit von Kernkraftwerken weiter zu verbessern. Im Jahr 2002 wurden einerseits Arbeiten zu einem Konzept für die Quantifizierung von menschlichen Fehlhandlungen, bzw. für deren Auftretenswahrscheinlichkeiten durchgeführt, andererseits wurden Software und Methoden für die dynamische Risikobeurteilung weiterentwickelt.

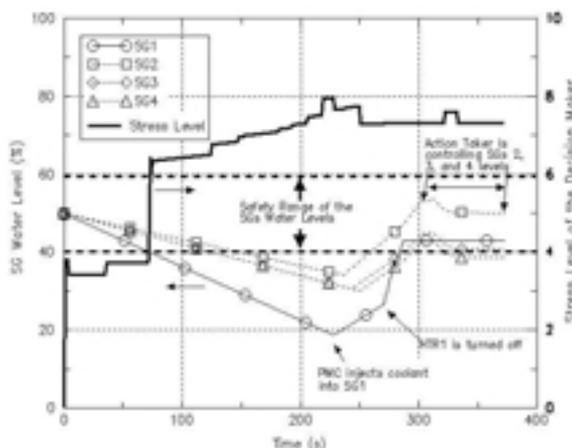


Abbildung: Die Entwicklung des Anlagenzustands beeinträchtigt das Stressniveau des Operateurs, welches wiederum seine Leistung beeinflusst (und die Wahrscheinlichkeit von Fehlhandlungen).

Schlüsselemente des Quantifizierungskonzepts, welches auch auf internationalen Konferenzen präsentiert wurde, sind Risikofaktoren, die an der Entstehung und Vermeidung möglicher Fehler beteiligt sind und eine qualitative Basis für das Quantifizierungsmodell bilden. Weiter werden Referenzfälle als Basis für die Schätzung von Fehlerwahrscheinlichkeiten herangezogen. Die Risikofaktoren sollen analytische Prognosen mit der Untersuchung von Ereignissen aus Simulatorstudien und aus Betriebserfahrungen verknüpfen. Auf dem Gebiet der dynamischen Risikobewertung wurde eine Fallstudie gestartet für die als erster Schritt eine Aufgabenanalyse auf der Anwendungsseite erstellt wurde. Ein wesentlicher Meilenstein für die Software-Infrastruktur war der Einbezug von Modellen, die für reale Problemstellungen geeignet sind.

OECD Halden Reactor Project – Man-Machine-Systems Research [5]

Im Programmbereich *Man-Machine Systems Research* werden quantitative Kenntnisse bezüglich der Leistungsfähigkeit und der Grenzen von Menschen bei der Überwachung und Steuerung komplexer Systeme erarbeitet. Dazu werden Untersuchungen zum Verhalten von Operateuren in verschiedenen Situationen durchgeführt, wobei auch die Effizienz von rechnergestützten Hilfsmitteln und Methoden der Informationsdarstellung beurteilt werden. In diesem Zusammenhang wird neben der Zuverlässigkeit automatisierter Systeme und sicherheitskritischer Software auch betrachtet, wie Operateure mit dem Ausfall solcher Systeme zurechtkommen (human centered automation). Arbeiten zur Überwachung und Optimierung

des Anlagenbetriebs ergänzen das Programm. Im Jahr 2002 wurde das Halden Man-Machine-Laboratory (*HAMMLAB*) für empirische Studien zum Zusammenspiel von Operateuren mit Kontroll- und Überwachungssystemen benutzt und unter anderem neue Technologien, neue Präsentationsmethoden und das Prinzip der "human centered automation" bezüglich ihrer Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit der Operateure getestet. Die gewonnenen Daten können zur Formulierung von Richtlinien verwendet werden.

Mehrere Systeme wurden im Berichtsjahr weiterentwickelt und in Pilotinstallationen im *HAMMLAB* verifiziert oder mit Daten aus Kernkraftwerken getestet. Dazu gehören *COPMA* (computerised procedure manual), *TEMPO* (thermal performance monitoring and optimisation) und *PEANO* für die on-line Kalibrierung von Messfühlern.



Abbildung: PEANO System für die on-line Kalibrierung von Messfühlern.

STRAHLENSCHUTZ- UND NOTFALLSCHUTZ-FORSCHUNG

Molekularbiologische Untersuchungen zur zellulären Radiosensitivität [7]

Das Projekt hat zum Ziel, die Radiosensitivität von Endothelzellen (Zellschicht, welche die Innenseite von Blutgefäßen auskleidet und gegenüber dem Gewebe abgrenzt) in Tumorblutgefäßen zu erhöhen und dadurch möglicherweise die Wirksamkeit von Radiotherapien zu verbessern, da das Wachstum vieler Tumoren von der Blutversorgung abhängig ist. Die Forschungsarbeiten liefern grundlegende Daten zur Radiosensitivität von Endothelzellen und sollen zur Entwicklung einer kombinierten Gen- und Radiotherapie beitragen. Dazu soll ein strahleninduzierbares Gen entwickelt werden, das zur Expression und Sekretion von toxischem Protein in bestrahlten Zellen führt.

Dieses könnte das Gewebe lokal beschädigen und damit die Radiotherapie von Tumoren unterstützen. Nach den letztjährigen negativen Resultaten mit der Charakterisierung des Gal-Elk Transkriptionssystems, wurden im Jahr 2002 zwei neue Methoden eingesetzt, um einen stärker strahleninduzierbaren Promoter zu identifizieren. Einerseits wurde das durch ionisierende Strahlung induzierbare System von p53 und p21 auf seine Funktionalität in Endothelzellen im Detail geprüft, andererseits wurde die Genexpression in Endothelzellen global mit Mikroarray-Technologie analysiert. Die Resultate zeigten, dass das p53-p21-System für radiotherapeutische Anwendungen nicht geeignet ist, da in den untersuchten Zellen eine nur geringe Induktion gefunden werden konnte. Es kann damit gefolgert werden, dass viele Gene in Endothelzellen nur schwach durch Strahlung induzierbar sind, da unter keiner der geprüften Bedingungen stark induzierbare Gene gefunden werden konnten. Das Ziel der selektiven Sensibilisierung von bestrahlten Zellen muss deshalb mit neuen Strategien angegangen werden. Momentan wird der Einfluss von einzelnen schwach induzierten Genen auf die Strahlenempfindlichkeit der Zellen untersucht.

Zusammenarbeit in der Dosimetrie [8]

Die Personendosimetrie ist eine wichtige Aufgabe des Strahlenschutzes. Im Zusammenhang mit Freigabemessungen haben auch die Oberflächenkontaminationsmessungen an Bedeutung gewonnen. In diesem Projekt sollen die entsprechenden normengerechten Messmethoden weiterentwickelt werden, welche eine hochstehende Qualität und die Vergleichbarkeit von Messresultaten sowie die Rückverfolgbarkeit der Messungen gewährleisten. Die Untersuchungen zur indirekten Bestimmung von Oberflächenkontaminationen konnten im Jahr 2002 erfolgreich abgeschlossen werden. Weiter wurde ein spezielles Kalibrierfass für die Messung der Aktivität von Abfallgebänden (Fassmessanlagen) konfiguriert, da die γ Strahlung von Abfallfässern durch massive Betonummantelungen sehr stark abgeschirmt wird. Die Einrichtung eines Kompetenzzentrums in der Sektion Messwesen des Paul Scherrer Instituts für die Überprüfung von Raum- und Abluftanlagen wurde im Berichtsjahr aufgenommen. Ziel ist die Bestimmung von Aerosolverlusten in komplexen Leitungssystemen. Dazu wurde ein Konzept erarbeitet, das auf der Doppelmarkierung eines Luftpakets mit fluoreszierenden Aerosolpartikeln definierter Größe und einem inerten Tracer gas basiert. In Bereich der Neutronendosimetrie konnten im Rahmen des EU-Projekt *EVIDOS* Messungen in den Neutronen-

Referenzfeldern der Anlage *CANEL* und mit den ISO-Quellen in Cadarache durchgeführt und so wertvolle Erkenntnisse für dieses komplexe Teilgebiet der Dosimetrie gewonnen werden.

Zusammenarbeit in der Radioanalytik [9]

In diesem Projekt sollen radiochemische Analyseverfahren für die Bestimmung von Spezialnukliden entwickelt und optimiert werden. Diese Verfahren werden für die Immissionsüberwachung sowie für die Inkorporationsüberwachung von strahlenexponierten Personen benötigt. Im Laufe des Jahres 2002 wurden radiochemische Methoden für die Bestimmung von Pu, Am, Cm, U, Th und Np in Urin- und Stuhlproben von strahlenexponierten Personen entwickelt und angewendet. Weiter wurde an einer Methode für die gleichzeitige Bestimmung von ^{89}Sr und ^{90}Sr im Reaktorwasser und in Umweltproben gearbeitet. Neben der Bestimmung von ^{14}C in Vegetationsproben aus der Umgebung des Paul Scherrer Instituts und der Kernkraftwerke Beznau und Leibstadt wurden im Rahmen der Experimente zur Migration von Radionukliden in geologischen Formationen einige Aktinide in Wasserproben des Felsenlabors Grimsel bestimmt. Ergänzt wurden die Projektarbeiten des Jahres 2002 durch internationale Vergleichsmessungen (Aktinide in Urin und Bodenproben).

Aeroradiometrie 2 [10]

Die Aeroradiometrie untersteht operationell der Nationalen Alarmzentrale (NAZ) und ist ein wesentliches Instrument der Einsatzorganisation Radioaktivität des Bundes (EOR). Die Einsatzbereitschaft wird durch eine ständige Wartung und die kontinuierliche Weiterentwicklung der



Abbildung: Gruppenbild des schweizerischen Mess-teams während der ECCOMAGS-Messübung 2002.

Methodik und der Messsysteme gewährleistet. Im Mai 2002 konnten bei einer internationalen Messübung in Schottland mit einem Super Puma der Schweizer Armee, der mit dem aeroradiometrischen Messsystem ausgerüstet war, wertvolle Messdaten gesammelt und die Ergebnisse mit denen anderer europäischer Teams verglichen werden. Die korrekte Kalibration des Messsystems wurde durch die sehr gute lineare Korrelation mit den Ergebnissen der anderen Teams bestätigt.

Mitte 2002 wurde der wissenschaftliche Bericht *Aeroradiometrische Messungen im Rahmen der Übung ARM01* publiziert und ein Beitrag an den Jahresbericht des Bundesamtes für Gesundheit verfasst. Für die Erfassung aller aeroradiometrischen Messdaten wurde eine Datenbankstruktur entwickelt und implementiert. Zudem wurde mit der Entwicklung einer Software begonnen, welche die bestehenden Rohdaten in die Datenbank einfüllt.

Nationale Zusammenarbeit

Auf nationaler Ebene war die Zusammenarbeit mit den forschungsausführenden Instituten effizient und fruchtbar. Im Rahmen der laufenden Projekte fanden regelmässig Beratungen mit der HSK statt, insbesondere auch zu geplanten Nachfolgeprojekten sowie zur Umsetzung der Resultate in die schweizerische Sicherheits- und Aufsichtspraxis. In diesem Zusammenhang wurde auch der Informationsaustausch mit allen diesbezüglich relevanten Institutionen in der Schweiz weiter gepflegt.

Neben dem *Paul Scherrer Institut* findet im Rahmen der regulatorischen Sicherheitsforschung die Zusammenarbeit mit den 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, ISREC, Universität Fribourg, Zwischenlager Würenlingen AG (ZWILAG).

Internationale Zusammenarbeit

Die folgenden Projekte sind direkt oder indirekt in Forschungsprojekte des 5. EU-Rahmenprogramms eingebunden:

RIKORR [1]: 5. EU-Rahmenprogramm, EURATOM, Nr. FIKS-2000-00048, CASTOC – Crack growth of low alloy steel for pressure boundary components under transient light water reactor operating conditions

STARS [2]: 5. EU-Rahmenprogramm, EURATOM, Nr. FIKS-2000-00041, NACUSP – Natural circulation and stability performance of BWRs

PHEBUS FP [4]: 5. EU-Rahmenprogramm, EURATOM, Nr. FIKS-1999-00008, ICHEMM – Iodine chemistry and mitigation methods

Zusammenarbeit in der Dosimetrie [8]: 5. EU-Rahmenprogramm, EURATOM, Nr. FIKR-2001-00175, EVIDOS – Evaluation of individual dosimetry in mixed neutron and photon radiation fields

Aeroradiometrie 2 [10]: 5. EU-Rahmenprogramm, EURATOM, Nr. FIKR-2000-20098, ECCOMAGS – European calibration and coordination of mobile and airborne gamma spectrometry

Bei den folgenden Projekten handelt es sich um internationale Kooperationsprogramme:

PHEBUS FP [4]

Halden Reactor Project [5]

Weitere internationale Kooperationen im Rahmen von Forschungsprojekten, internationalen Organisationen und Standardisierungsaktivitäten können den einzelnen Projektberichten entnommen werden.

Bewertung 2002 und Ausblick 2003

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 sehr guten Arbeitsbeziehungen mit den Projektleitern und ihren Teams jederzeit reibungslos erfolgen. Der Kompetenzerhalt und -ausbau innerhalb der Aufsichtsbehörde sowie die Bereitstellung von spannenden 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 2003 gestartet werden, orientieren sich inhaltlich ebenfalls an den einleitend beschriebenen Forschungsschwerpunkten. Grösstenteils handelt es sich dabei um Nachfolgeprojekte der im Berichtsjahr abgeschlossenen Aktivitäten.

Im Jahr 2002 nahm eine gemeinsame Arbeitsgruppe der HSK und der Eidgenössischen Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA) ihre Arbeit zum Thema "Strategie Regulatorische Sicherheitsforschung" auf. Das grosse Spektrum an technischem und wissenschaftlichen Wissen der Mitglieder der Arbeitsgruppe gewährleistet einen zielgerichteten Meinungsaustausch und die sachliche Diskussion der künftigen Forschungsschwerpunkte in einem breiteren Kontext. Die Aufgabe der Arbeitsgruppe ist es, unter Berücksichtigung des Energieforschungskonzeptes der CORE, eine längerfristige Vision und eine mittelfristige Strategie für die Regulatorische Sicherheitsforschung zu erarbeiten, die bestehenden Potentiale zu definieren, Schwerpunkte für das Forschungsprogramm zu setzen und Empfehlungen zu Konzepten, Planungsinstrumenten und Rahmenbedingungen für die schrittweise Umsetzung der Strategie abzugeben.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden

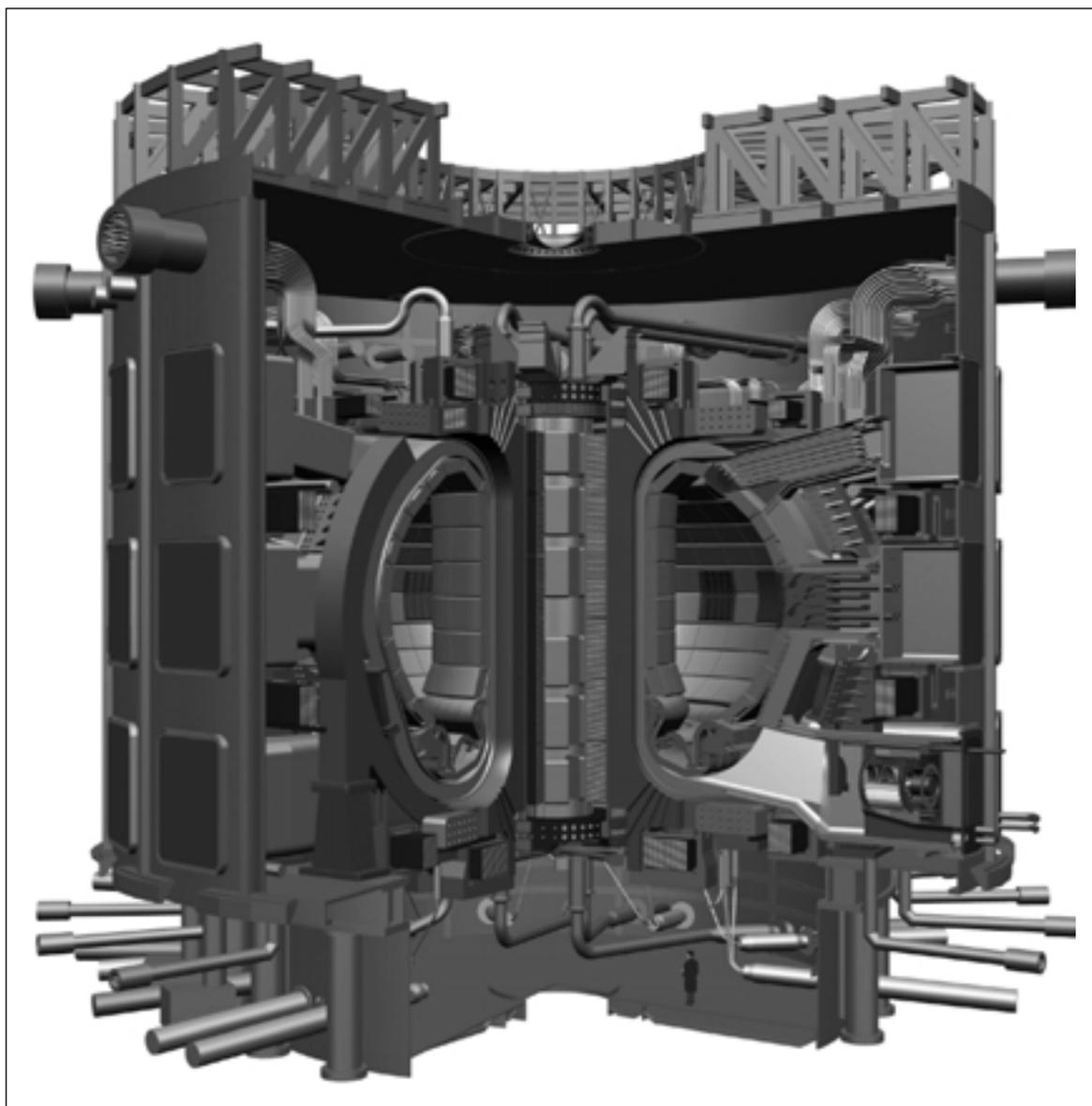
- [1] H.P. Seifert (hans-peter.seifert@psi.ch), S. Ritter, U. Ineichen, U. Tschanz, B. Gerodetti, Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Risskorrosion in druckführenden ferritischen Komponenten des Primärkreislaufs von SWR** (SB)
- [2] M. A. Zimmermann (martin.zimmermann@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Sicherheitsforschung bezüglich Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz (STARS)** (JB)
- [3] A. Becker, D. Giardini (becker@seismo.ifg.ethz.ch), ETH Zürich, Institut für Geophysik, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich, **Reconstructing the paleoseismological record in Northern Switzerland (PALEOSEIS)** (SB)
- [4] 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)
- [5] W. Wiesenack, F. Øwre (wolfgang.wiesenack@hrp.no), Halden Reactor Project, N-1750 Halden, Norway, **OECD Halden Reactor Project: Nuclear Safety and Reliability, Man-Machine-Systems Research** (JB)
- [6] V. N. Dang (vinh.dang@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Human Reliability Analysis (HRA) Applications and Methods Development** (SB)
- [7] 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)
- [8] Ch. Schuler, M. Boschung, G. Butterweck, C. Wernli (christoph.schuler@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Zusammenarbeit in der Dosimetrie** (JB)
- [9] S. Bajo, J. Eikenberg (sixto.bajo@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Radioanalytique** (JB)
- [10] B. Bucher, Ch. Wernli (benno.bucher@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Aeroradiometrie 2** (JB)

FUSION THERMONUCLÉAIRE CONTRÔLÉE

Rapport de synthèse pour le programme de recherche 2002

Jean-François Conscience

conscience@bbw.admin.ch



ITER: la prochaine grande installation internationale de recherche pour la fusion

Centres de gravité du programme

En 2002, le *Fusion Power Co-ordinating Committee* de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) a préparé un court résumé de l'état actuel des recherches en matière de fusion thermonucléaire contrôlée qui met clairement en évidence les progrès accomplis et le chemin qui reste à parcourir. Ce texte est reproduit ici dans sa version originale anglaise.

When will fusion power be available ? The question is today of particular interest as the international community will soon be asked to invest 4'500 million in the *International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)*. Under the auspices of the *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, the milestone project, now in negotiation, will be a joint venture of many countries with, as main partners, Canada, China, the European Union (EU) including Switzerland and several candidate countries, Japan, the Russian Federation and the USA. The design of what will be the first fusion reactor producing significant amounts of energy was completed in June 2001, and sites for hosting the facility have been offered by Canada, the EU (in France and in Spain) and Japan.

The facts

Technical feasibility – Production of fusion energy has been demonstrated in experimental devices at levels of up to several megawatts for short time spans. Scientific and technological know-how, leading to an agreed design, is now available for the construction of the first experimental reactor, **ITER**, in order to demonstrate that harvesting power from thermonuclear fusion is indeed scientifically and technically feasible. Thus, fusion energy generation on a commercial scale is not dependent upon further scientific breakthroughs; it is a matter of research and development to optimise existing concepts and technologies, and it requires both large international facilities and strong domestic programs of supporting research. As materials with high irradiation resistance and low neutron-induced activation are of particular importance for highly performing, environmentally benign and economically attractive power plants, an *International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)* is being designed to test materials for fusion.

Safety – Extensive studies have shown that fusion is inherently safe and environmentally friendly. Initiating and maintaining fusion reactions require a number of such highly uncommon physical conditions that failure of components or uncon-

trolled operation immediately leads to reactor shut down. Although a fusion reactor contains significant amounts of tritium – a radioactive isotope of hydrogen, which, together with non-radioactive deuterium, makes up the fusion fuel – the worst in-plant generated accident would result in limited hazards to the public. Similarly, the consequences of accidents caused by external events, such as a very large earthquake, would be far less severe than those of the event itself. Finally, fusion fuels or materials are not subject to non-proliferation treaties because none of them poses a security threat with respect to nuclear weapon development.

Environment – The fusion reactions produce no greenhouse gas and no radioactive or toxic products, but neutron-induced radio-activation of the inner reactor walls does occur. Almost all of the activated materials, however, can be disposed of as inert waste, recycled, or given shallow-land disposal a few decades after the end of operation. Further, it is reasonable to expect that future research on materials will optimise this aspect.

Security of fuel supply – Tritium is produced in the fusion reactor from lithium, an element which, like deuterium, is plentiful, widespread and available at low cost. It is recalled in this context that fusion reactions release huge amounts of energy : 0.1 ton of deuterium and 4 tons of lithium would be enough to fuel for one year a 1000 MW electrical power plant requiring today 2.1 million tons of coal, or 10 million barrels of oil, or 100 tons of uranium.

Economics – The estimated costs of **ITER** have been validated by industry. The final costs of fusion electricity are estimated by extrapolating from the **ITER** costs and will depend upon the extent to which fusion physics, technologies, and materials are further optimised in the next few decades. Despite these uncertainties, current evaluations show that fusion electricity would be competitive in the future energy market. This is all the more so if emission mitigation costs such as carbon sequestration or external costs (e.g., environmental damage, adverse health impacts) are taken into account, and the significance of these costs is expected to grow in the future. Under these conditions, the projected cost of fusion electricity is comparable to that of other, environmentally friendly sources, thus ensuring it a significant share of the market by the end of the century.

Social acceptance – Ongoing social studies indicate that no specific public acceptance problems are expected for fusion if comprehensive information is available and if the public is actively involved in the decision process at an early stage.

The questions

When will fusion power be available? Despite significant progress, it is an acknowledged fact that the practicality and economical feasibility of harvesting fusion power remain to be demonstrated. **ITER** construction and operation are major steps toward that goal. The experimental reactor is designed to be a flexible test facility capable of producing a significant amount of thermal power (500 MW) under conditions mimicking those of a power plant. After about 10 years of construction, it will be exploited for 10 to 20 years, and, combined with the materials development programme, it will tell whether a demonstration power plant can be brought on line approximately 35 years from now. This would then lead to the first prototype commercial power plant toward the middle of the century. Stronger political will, leading to quicker decisions and heavier initial investments, could shorten markedly the development time ("fast track" scenario).

Why is it still so far away ? Since the 1960's, fusion research has often been perceived as an expensive, moving target, because the fusion community regularly had to revise its estimate of the time needed to bring the technology to maturity. With the benefit of hindsight, it is easy to understand why. The most important factor was the initial lack of knowledge in the state of matter to be reached in order to allow a fusion power plant to work. The construction of a series of experimental devices has enabled the building up of the necessary experimental data and the testing of theoretical models which allow now to undertake with confidence the development of fusion as an energy source.

Why invest in fusion? The difficulties in solving the vital problem of providing energy for the future, with assurance of a secure supply while avoiding climate change, are universally recognised. No technological options can be ignored and, among these, fusion is a principal candidate for major

contributions to the energy future, in particular for the centralised supply of base-load electricity. Indeed, socio-economic studies of long-term energy scenarios show that the cost, including externalities, of satisfying energy demand without fusion would be huge, dwarfing the cost of fusion development.

How is fusion research co-ordinated? Worldwide co-operation on fusion is established primarily within the framework of the IAEA and the IEA. The IEA *Fusion Power Coordinating Committee* coordinates the activities of eight *Implementing Agreements* fostering international cooperation on many fusion-relevant topics. One of these agreements, devoted to fusion materials, is the technology incubator for **IFMIF**. Several countries have national fusion research programmes which, in Europe, are largely integrated into the Euratom fusion programme of the European Union.

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), dont notre pays est membre de plein droit depuis 1978. Financées par le Conseil des Écoles polytechniques (CEPF), le Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS) et l'Union Européenne (UE), elles sont effectuées, pour l'essentiel, au Centre de recherche en physique des plasmas (CRPP) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), à Lausanne et à l'Institut Paul Scherrer (PSI). En outre, avec un soutien financier de l'OFEN, des recherches, portant sur le comportement physico-chimique des parois des réacteurs de fusion après interactions avec le plasma, sont conduites par le groupe du professeur Oelhafen, à l'Institut de physique de l'Université de Bâle. Sur le plan administratif, la recherche en matière de fusion thermonucléaire 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, et qui peut être commandé auprès du chef de programme.

Travaux effectués et résultats acquis en 2002

L'ESSENTIEL EN BREF...

- Le Japon a proposé officiellement de construire **ITER** à Rokkasho-mura, dans la partie nord de son île principale, ce qui porte maintenant à quatre le nombre (probablement définitif) des sites candidats; à part le site japonais, il s'agit de Cadarache (France), Clarington (Canada) et Vandellòs (Espagne).
- Tout au long de l'année, la Chine et les USA ont exprimé une volonté croissante de s'associer au projet **ITER** et des déclarations officielles à cet effet sont attendues pour le début de l'année 2003¹; il est intéressant de noter que le scénario "*fast track*", qui prévoit une commercialisation de l'énergie de fusion 20 ou 25 ans plus tôt que le calendrier actuel (50 ans), suscite un intérêt considérable aux USA.
- Le 3 juin 2002, le Conseil de l'Union Européenne a adopté le 6^e Programme-cadre de recherche et de formation de la Communauté Européenne de l'Énergie Atomique (Euratom) dans le domaine de l'énergie nucléaire et confirmé un budget de 750 millions d'euros pour la fusion; sur cette base, la Commission Européenne a fixé à 20% (40% pour les activités prioritaires) le niveau du soutien communautaire aux activités de recherche effectuées dans les laboratoires nationaux associés au programme; c'est là une diminution sensible par rapport aux niveaux du 5^e Programme-cadre (25% et 45%).
- Le 9 décembre 2002, le Conseil fédéral suisse a adopté la prolongation de quatre accords avec Euratom en matière de fusion: le *European Fusion Development Agreement* (EFDA), le *JET Implementing Agreement* (JIA), le *Contrat de mobilité* et le *Contrat d'association*, assurant ainsi la poursuite d'une collaboration de longue durée.
- Le CRPP, à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), a été choisi comme chef de file responsable par les différents laboratoires nationaux auxquels seront confiés le développement et la construction du système de chauffage du plasma d'**ITER** par onde cyclotron électronique.

ITER (INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REACTOR)

Sur la base du *Final Design Report* publié en 2001, les négociations et les travaux préparatoires pour construire la prochaine grande installation de recherche en fusion se sont poursuivis activement en 2002. Il est toujours prévu de conclure ces préparatifs par des accord formels portant sur la nature de l'organisation internationale qui gèrera le projet, le partage des coûts et le site d'ici fin 2004, ce qui permettrait à la construction d'**ITER** de commencer en 2005 ou 2006. Le Japon a proposé d'implanter **ITER** dans la partie nord de son île principale et le choix d'un site définitif doit maintenant se faire entre le Canada (Ontario), l'Espagne (Catalogne), la France (Provence) et la Japon. Le projet a incontestablement gagné en dynamisme et les partenaires originaux (Canada, Japon, Fédération de Russie et Union Européenne) seront bientôt rejoints par la Chine, les États-Unis, la Corée du Sud et, vraisemblablement, d'autres pays encore (Inde, Brésil). Ainsi **ITER** se profile comme un projet vraiment international, attirant l'intérêt non seulement des nations industrialisées mais aussi de grands pays en voie de développement.

COOPÉRATION EUROPÉENNE DANS LE CADRE D'EURATOM

Pratiquement toute la recherche effectuée en Europe dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée se déroule au sein d'un programme de l'Union Européenne, dans le cadre du traité Euratom. Ce programme, 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** à Culham, au Royaume-Uni, de même que la participation européenne à **ITER**. En outre, il co-finance de nombreuses activités conduites dans des laboratoires nationaux qui lui sont associés, comme, pour la Suisse, le CRPP. Au titre du 5^e Programme-cadre (1998-2002) la recherche en fusion dispose de 788 millions d'Euros. Le 3 juin 2002, le Conseil de l'Union Européenne a définitivement approuvé le 6^e Programme-cadre d'Euratom (2002-2006) et confirmé l'attribution de 750 millions d'Euros à la fusion, dont 200 millions sont réservés pour la participation européenne à **ITER**. Cette décision entérine la volonté de l'Europe de jouer un rôle important

¹ Pour les USA, c'est chose faite depuis le 30 janvier 2003.

dans ce grand projet international mais elle correspond aussi à une diminution sensible (40%) des sommes que le programme fusion d'Euratom peut mettre à disposition des laboratoires nationaux associés. C'est maintenant aux pays membres du programme, y compris la Suisse, de voir comment et dans quelle mesure ils sont à même de combler ce déficit; les efforts dans ce sens se sont poursuivis en 2002 mais ils n'ont pas abouti jusqu'à présent.

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. En raison du passage du 5^e au 6^e Programme-cadre, il a fallu négocier à nouveau les accords plus spécialisés qui fixent les modalités de la coopération européenne en matière de fusion. Ces accords sont actuellement au nombre de quatre: l'EFDA (*European Fusion Development Agreement*), le JIA (*JET Implementing Agreement*), qui règle l'utilisation de la grande installation européenne à Culham, au Royaume Uni, 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. Après des négociations parfois ardues en raison du niveau de financement réduit, le Conseil fédéral donna son accord à la prolongation de ces quatre accords le 9 décembre 2002. La contribution suisse annuelle au programme fusion d'Euratom restera un peu inférieure à 10 millions de francs au terme des accords renouvelés; elle est couverte par les crédits ouverts pour financer la participation suisse au 6^e Programme-cadre de l'Union Européenne et qui sont gérés par l'OFES.

LE CRPP À L'EPF DE LAUSANNE: L'ASSOCIATION SUISSE/EURATOM

Les activités du programme fusion européen sont très orientées vers **ITER**. À cet égard, le **JET** (*Joint European Torus*) est devenu un véritable banc d'essai pour les technologies d'**ITER** car le grand *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 (*International Fusion Material Irradiation Facility*, **IFMIF**). En 2002, le CRPP a continué d'être étroitement associé à toutes ces activités². 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 sur le site de l'EPFL et, d'autre part, sur la supraconductivité et les matériaux sur le site du PSI³.

Le **TCV** (*Tokamak à Configuration Variable*) est la grande 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 explorer de nouveaux domaines d'opération et pour planifier la géométrie optimale du cœur des futures centrales thermonucléaires. En 2002, le **TCV** a été exploité avec son système de chauffage cyclotron électronique de 3 MW à 82,7 GHz et de 1,5 MW à 118 GHz. Ce système de chauffage aux harmoniques de la fréquence cyclotron électronique est le plus puissant du monde. Les études expérimentales ont porté sur:

- l'extension du domaine d'exploitation du **TCV** à l'aide du chauffage additionnel;
- l'étude de l'absorption des ondes cyclotron électroniques à la troisième harmonique (118 GHz): l'utilisation de la troisième harmonique permet l'absorption à des densités supérieures à celles utilisées lors des expériences utilisant les ondes à 82,7 GHz;
- une étude des propriétés de confinement (particules et énergie) en fonction de la forme du plasma: les propriétés du cœur chaud et du plasma du bord sont étudiées dans ce programme;
- l'extension des limites de densités;
- des études des "modes H" (c'est-à-dire à haut confinement d'énergie) analogues à ceux qui seront utilisés dans **ITER**, des barrières de transport et des propriétés des "diverteurs".

En parallèle avec l'exploitation du **TCV**, l'équipe de physiciens du *tokamak* a participé aux diverses campagnes scientifiques du **JET**, en tant que responsables d'expériences ou de projets de développement de diagnostic, ou encore comme membres d'équipes scientifiques européennes.

La modélisation des plasmas a toujours été un point fort du CRPP, qui a continué à bénéficier

² Les personnes qui désirent plus détails sur les recherches du CRPP peuvent commander le Rapport annuel que publie cette institution (<http://crppwww.epfl.ch>).

³ Les recherches du CRPP en supraconductivité et en matériaux bénéficient d'un soutien financier du PSI.

des capacités de calcul du Centre suisse de calcul scientifique (CSCS) à Manno et de l'Institut de physique des plasmas (IPP) à Garching. Les études théoriques et de simulation numérique ont porté sur:

- une meilleure compréhension de la physique du transport dans les plasmas confinés par champs magnétiques; nous avons concentré nos efforts sur l'influence des micro-instabilités liées à des gradients de densité de température ionique ("*Ion Temperature Gradient mode*");
- le support théorique aux expériences sur **TCV**, **JET** et autres installations;
- l'exploration de nouvelles structures magnétiques tri-dimensionnelles du point de vue de l'équilibre et de la stabilité.

Dans le domaine des *gyrotrons* (qui sont des sources d'ondes électromagnétiques à haute fréquence et à haute puissance), en collaboration avec les Associations FZK (Allemagne), Tekes (Finlande) et la firme Thalès (France), un *gyrotron* à 140 GHz a été testé: une puissance de 0,85 MW en impulsion de 180 s a été obtenue, ce qui constitue un record mondial pour ce type de source micro-onde.

Le CRPP a contribué aux travaux préparatoires européens pour la construction d'**ITER** dans les domaines du chauffage cyclotron électronique (développement d'un gyrotron de 2 MW à 170 GHz et d'une antenne spéciale pour injecter l'onde ainsi produite dans **ITER**) et du contrôle du plasma. Le CRPP a été choisi comme chef de file par les laboratoires européens chargés de développer et de construire le système de chauffage par onde cyclotron électronique d'**ITER**.

Afin de renforcer la physique de base des plasmas chauds, une nouvelle expérience appelée **TORPEX** a été construite en 2002. Son exploitation scientifique commencera en 2003.

En supraconductivité, le CRPP a continué de profiter des propriétés uniques au monde de son banc d'essai **SULTAN** au PSI pour tester des câbles et des jonctions de câbles supraconducteurs à base de niobium et de titane, destinés à **ITER**. Des développements de nouveaux câbles ont été entrepris. La Commission Européenne a également l'intention d'offrir, comme contribution européenne en nature à la construction d'**ITER**, le test de tous les câbles supraconducteurs du futur réacteur sur **SULTAN**.

Enfin, les études de matériaux à basse activation se sont poursuivies sur l'installation PIREX, également au PSI. Elles portent surtout sur des aciers ferritiques-martensitiques (Eurofer). Le PSI a donné son accord à une poursuite de ces études sur sa source de neutrons de spallation SINQ et des expériences y ont déjà été effectuées. Il est prévu de mettre hors service PIREX à la fin de 2003.

Parmi les faits saillants dans le domaine des matériaux, on retiendra l'observation de la formation de petites cavités (d'environ 1 nm) dans des échantillons d'acier ferritique-martensitique irradiés dans **SINQ** à des doses de 10 à 12 dpa. L'influence de ces cavités sur les propriétés mécaniques des aciers est en cours d'étude.

L'année 2002 a également connu un événement marquant: l'organisation par le CRPP de la 29^e Conférence Européenne sur la Physique des Plasmas et la Fusion Contrôlée, qui a rassemblé environ 700 physiciens venant du monde entier à Montreux.

Les recherches faites au CRPP bénéficient de nombreuses collaborations internationales, tant au sein du réseau des Associations européennes qu'avec les laboratoires de fusion américains, indiens, japonais et russes. Cette collaboration internationale a permis un large rayonnement de nos travaux et de nombreux échanges de personnel scientifique, en particulier grâce au programme de mobilité européen.

Collaboration avec l'Université de Bâle [1]

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 de l'EPFL. Des tuiles de carbone placées à l'intérieur du *tokamak 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). Ces études se sont poursuivies en 2002 et ont gagné en sensibilité et en ampleur grâce à l'utilisation, en collaboration avec l'Université de Freiburg i. B., de méthodes analytiques fondées sur l'émission de rayons X induite par des protons (**PIXE**) et sur la spectrométrie par «Rétrodiffusion de Rutherford» (RBS). Un rapport détaillé sur ces activités, qui sont partiellement financées par l'OFEN, est joint à ce compte-rendu.

L'utilisation complémentaire de ces deux techniques se justifie par la plus grande profondeur d'analyse et la taille maximale des échantillons pouvant être sondés. En effet, des tuiles de graphite entières ne peuvent pas être examinées dans la chambre de la spectroscopie à photoélectrons.

Le procédé de boruration a été appliqué à plusieurs substrats de silicium dans le *tokamak TCV* (EPFL / CRPP) afin de caractériser leurs surfaces. Les mesures RBS confirment le résultat antérieu-

rement obtenu par la spectroscopie à photoélectrons, à savoir de faibles contaminations en oxygène et en carbone. Le **PIXE** révèle la présence surprenante de faibles concentrations en cuivre et, probablement, de l'acier inoxydable (Ni, Cr, Fe).

Les mêmes analyses appliquées à des échantillons en carbone indiquent aussi la présence d'oxygène, des éléments de l'acier inoxydable et de cuivre. La comparaison avec la spectroscopie à photoélectrons montre que les éléments de l'acier inoxydable ne sont pas directement localisés à la surface. Les quantifications des éléments par les trois méthodes de caractérisations sont en bon accord.

Une analyse préliminaire de couches de tungstène a été réalisée. Des concentrations en oxygène de 20 à 40% ont été détectées, ce qui met en évidence la grande réactivité du tungstène avec l'oxygène. Cet aspect va être approfondi dans le cadre de futures expériences mettant en jeu différentes conditions expérimentales, comme la température du dépôt.

Le projet «*Surface studies related to fusion reactor materials*» arrivant à sa fin en 2003, un nouveau projet intitulé «*Plasma-wall interaction studies related to fusion reactor materials*» a été déposé afin de poursuivre les travaux de recherche entre 2003 et 2006.

Autres collaborations et aspects internationaux

COLLABORATION DANS LE CADRE DE L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE (AIE)

Les activités de l'AIE en fusion nucléaire sont étroitement coordonnées avec les programmes de recherche nationaux et avec d'autres programmes internationaux, y compris le programme Euratom. Les Accords d'exécution (*Implementing Agreements*) permettent de réaliser des activités de R&D en exploitant efficacement le savoir combiné d'experts et en évitant des duplications inutiles. Huit Accords sont actuellement en cours d'exécution. Ils couvrent des thèmes divers liés à

la physique des plasmas, aux matériaux et aux aspects socio-économiques de la fusion. Euratom participe à tous et les chercheurs suisses sont directement impliqués dans deux d'entre eux, l'un concernant la recherche sur les matériaux, l'autre étudiant les échanges de chaleur entre le plasma et la paroi du réacteur. L'un de ces Accords, celui consacré à la recherche sur les matériaux, revêt une importance toute particulière. En effet, l'une de ses tâches est de planifier la source de neutrons **IFMIF** qui est tout aussi incontournable qu'**ITER** dans la quête du contrôle de la fusion thermonucléaire.

Liste des projets de R+D

- [1] P. Oelhafen, (peter.oelhafen@unibas.ch ; <http://monet.unibas.ch/oelhafen/>), Institut für Physik der Universität Basel : Surface Studies Related to Fusion Reactor Materials. Phase II : Reactivity and Properties of Materials. RA 2002.

Remerciements

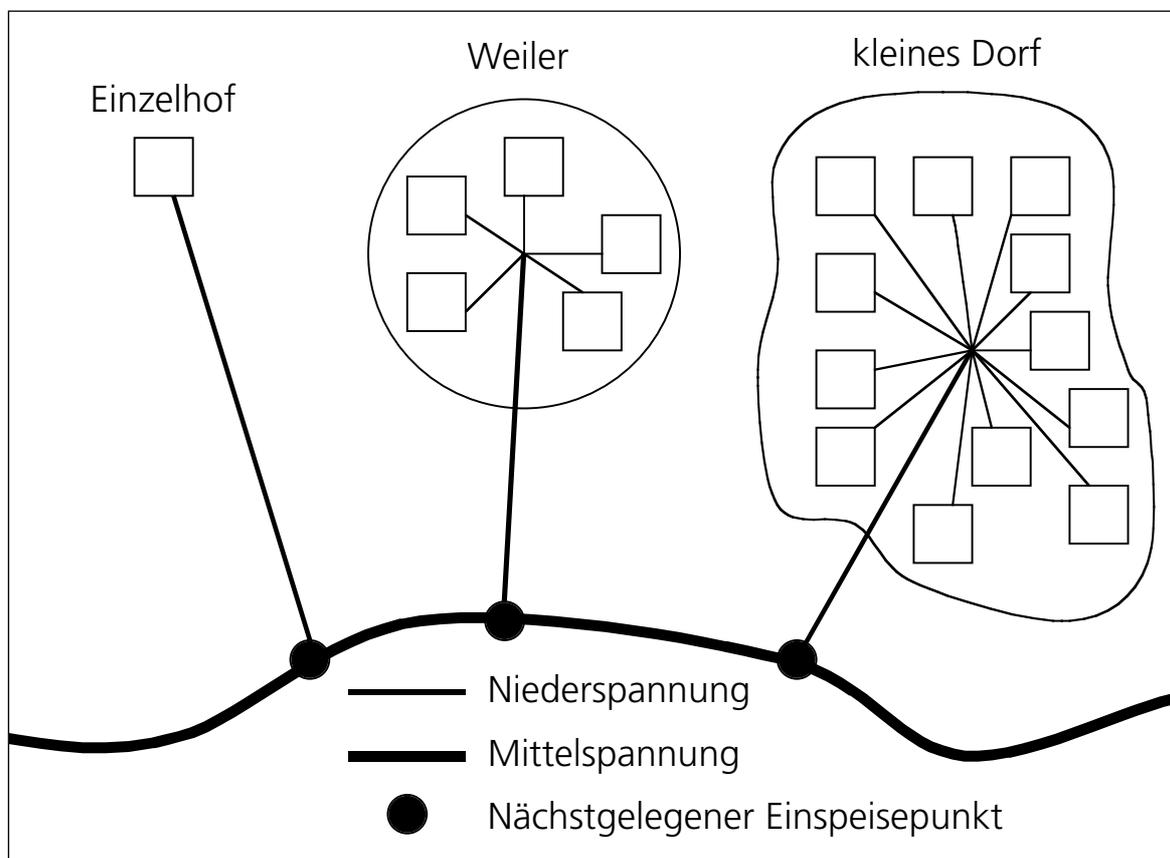
L'auteur remercie le Professeur Minh Quang Tran, Directeur du CRPP, de son aide pour la rédaction des paragraphes concernant les recherches menées à son institution. Il remercie également le Professeur Peter Oelhafen de sa contribution.

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN EWG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2002

Ruedi Meier

ruedimeier@bluewin.ch



Fallbeispiele dezentraler Erschliessung aus Sicht der Stromerschliessung

Die Sticheleitung (Mittelspannung) verbindet das Objekt (Einzelhof, Weiler, kleines Dorf) mit dem nächstgelegenen Einspeisepunkt (Verbindung zu bestehender Mittelspannungsleitung). Quelle: Ecoplan/Eicher +Pauli, EWG Jahresbericht 2002)

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 Begebenheiten im Energiebereich ausgegangen, um darauf abgestützt die zentralen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Fragen fokussiert und mit eigenen 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 denn praktisch alle Projekte des Forschungsprogramms *Energiewirtschaftliche Grundlagen* 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 2002 standen wiederum die Analyse der Kosten- und Wirtschaftlichkeit von Energiesystemen und die Untersuchung der Wirkungsweise von Massnahmen (inklusive Lösungsansätze) im

Vordergrund. Anlässlich einer Veranstaltung im März 2002 konnten die Forschungsergebnisse und Grundlagenarbeiten zum eidgenössischen Elektrizitätsmarktgesetz vor rund 150 Teilnehmern präsentiert werden und im September 2002 wurde eine Veranstaltung an der ETH zusammen mit dem Forschungsprogramm *Rationelle Energienutzung in Gebäuden* zum Thema *Bauen, Sanieren, wirtschaftlich Investieren – Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit im Einklang* durchgeführt. Die Referate der Veranstaltung sind in einer Publikation im Rüegger Verlag erschienen [27]. Die Veranstaltung ist auf ein positives Echo gestossen und verschiedene Fach- aber auch Tageszeitungen haben einzelne Beiträge der Publikation aufgenommen. Weitere Artikel zu einzelnen Projekten sind in diversen Fachorganen erschienen.

Im Frühjahr bzw. Sommer 2002 sind zwei Ausschreibungsrunden mit 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 ausgeschriebenem Projekt werden ca. drei Offerten eingereicht. Die Offerteingaben weisen in der Regel ein hohes Niveau auf. Beim Programm EWG wird auf eine präzise Definition der Forschungsprojekte in einem frühen Zeitpunkt Wert gelegt. Dabei findet auch eine Abstimmung der Fragestellungen, des methodischen Vorgehens etc. innerhalb des Bundesamts für Energie wie auch mit den interessierten Kantonen sowie Fachverbänden und -organisationen statt. Dieses – wenn auch teilweise zeitraubende – Verfahren, stellt sich in der Regel im Laufe der Bearbeitung der Projekte als positiv heraus: Die forschenden Teams gehen auf echte Erkenntnislücken ein und neue Handlungsanweisungen für eine effizientere, wirksame Energiepolitik können aufgrund der Forschungsergebnisse abgegeben werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2002

DATEN

Das Projekt **Indikatoren zu ausgewählten kantonalen Energiemassnahmen** [1] konnte im Februar 2002 abgeschlossen werden. Dank der drei Erhebungen in den Jahren 1996, 1998 und 2000 können Entwicklungen und Trends der kantona-

len Energiepolitik, wenn teilweise auch nur mit beschränkter Interpretation, aufgezeigt werden. Eine weitere Erhebung mit teilweise angepassten sowie ergänzten Indikatoren ist für das Jahr 2003 geplant.

MODELLE UND PERSPEKTIVEN

Das Projekt **CO₂-Reduktion durch Beeinflussung der Treibstoffe** [2] geht der Frage nach, inwiefern eine Reduktion des Dieselpreises um mind. 25 % – bei einer Kompensation über den Benzinpreis – einen Beitrag zur Erreichung der CO₂-Emissionsminderungen gemäss CO₂-Gesetz herbeiführen könnte. Dabei wird dieses Vorgehen als nicht zielführend beurteilt, da letztlich der massgebende Treibstoffabsatz und damit die der Schweiz angerechneten CO₂-Emissionen zu- statt abnehmen. Weiter wird auf umweltseitige Vorbehalte (höhere NOX- und vor allem Partikelemissionen) hingewiesen. Weniger kritisch wird eine modifizierte Massnahme, das heisst eine fixe Differenz zwischen Benzin- und Dieselpreisen von beispielsweise 25 Rappen pro Liter, beurteilt. Dieses Vorgehen würde etwa 10 % der angestrebten CO₂-Emissionen im Bereich Treibstoffe (minus 15 % oder 2 bis 2,5 Mio. t CO₂-Emissionsminderung im Jahr 2010 gegenüber 1990) herbeiführen. Als wirksamere Massnahmen schlagen die Autoren ein Bonus-Malus-System vor, das gezielt energieeffiziente und gegebenenfalls emissionsärmere Fahrzeuge fördert. Eine ungerechtfertigte Bevorzugung mit einer Absenkung des Dieselpreises für den Güterverkehr könnte verhindert werden. Zudem wird auf die positiven Wirkungen einer Gasförderung im Bereich der Treibstoffe hingewiesen, wobei sich vor allem Bio-Treibstoffe als besonders vorteilhaft erweisen könnten.

KOSTEN/WIRTSCHAFTLICHKEIT UND AKZEPTANZ VON ENERGIESYSTEMEN

Das Projekt **Neubauen statt Sanieren** [3] konnte im Frühjahr 2002 definitiv abgeschlossen werden. Die Analyse der Erneuerungstätigkeit zeigte unter anderem, dass in vielen Regionen ein Erneuerungsstau herrscht und sowohl Ersatzneubauten wie auch Gesamtsanierungen Gefahr laufen, nicht mehr kostendeckend vermietbar zu sein. Ersatzneubauten bieten generell einen deutlich grösseren Handlungsspielraum als Gesamtsanierungen und werden sich vor allem an guten Lagen in Zukunft vermehrt durchsetzen. Es kann eine zukunftsgerichtete Erneuerung realisiert (z.B. Zimmereinteilung, Lärmschutz) und veränderten planungsrechtlichen Voraussetzungen Rechnung getragen werden. Sowohl Ersatzneubauten als auch Gesamterneuerungen führen zum Verlust von billigem Wohnraum, der aber mittelfristig kompensiert wird. Zur Förderung der Gebäudeerneuerung und der Ersatzneubauten werden primär Anpassungen beim Miet- (volle Überwälzung) und Steuerrecht (erhöhte Abschreibung, Reduktion Erschliessungsgebühren) vorgeschlagen.

Das Projekt **Marginale Zahlungsbereitschaft für eine erhöhte Internalisierung des Risikos von Kernkraftwerken** [4] geht der Frage nach, inwiefern eine vermehrte Internalisierung der finanziellen Risiken durch eine Ausdehnung der für Kernkraftwerke vorgeschriebenen Haftpflichtversicherung besteht. Dabei ist eine neue Methode (*Stated Choice Experiment*) zur Messung der Zahlungsbereitschaft angewendet worden. Die Studie kommt zum Ergebnis, dass einem schweizerischen Individuum mit durchschnittlichen Eigenschaften eine marginal erhöhte Deckung über zur Zeit 1 Mia. Franken hinaus rund 0.12 Rp. pro kWh wert wäre, wobei die zusätzlichen Kosten einer vorgeschriebenen Deckung von 1 Mia. auf 4 Mia. Franken mit einem Preiszuschlag mit nur gerade 0.011 Rp. pro kWh anfallen würden. Damit kann gesagt werden, dass eine Vervierfachung der zur Zeit gültigen Deckung eine paretooptimale Verbesserung bedeuten könnte. Bei einer Erhöhung der Deckung auf 100 Mia. Franken (von 0.5 auf 50 % des angenommenen Schadens von 200 Mia. Franken) wird eine Zahlungsbereitschaft für eine Durchschnittsperson von rund 6 Rp. pro kWh geschätzt. In der Studie wird auf verschiedene Faktoren wie Partialbetrachtung, strategisches Verhalten der Interviewten, fehlende Analyse eines grossen Unfalls etc. hingewiesen, die eine gewisse Relativierung der Forschungsergebnisse verlangen.

Mit dem Projekt **Grenzkosten bei forcierten Energieeffizienzmassnahmen** [5] sind die Kosten und Nutzen von energetischen Effizienzinvestitionen bei Wohngebäuden (insbesondere Wärmeschutzinvestitionen) als Funktion einer forcierten Energieeffizienz für Neubauten wie Sanierungen bei Ein- und Mehrfamilienhäusern geschätzt und empirisch berechnet worden. Ausgangspunkte sind dabei die geltenden SIA-Normen für energieeffizientes Bauen und – als weitergehende Anforderungen – der *Minergie-* bzw. der *Minergie-P-*Standard. Es wurden für einzelne Bauteile wie auch für gesamte Gebäudekonzepte Durchschnitts- und Grenzkosten berechnet. Um zu den direkten Mehrkosten zu gelangen, wurde der Nutzen der vermiedenen Wärmekosten abgezogen. Mit der Methode der Erfahrungskurven (Lern- und Skaleneffekte), konnten die Kostenberechnungen für zukünftige Zeiträume dynamisiert werden. Es zeigte sich dabei, dass das Energieeffizienzpotenzial bei Gebäuden gross ist und bei einem effizienten, systematischen Vorgehen beinahe die Wirtschaftlichkeit erreicht werden kann. Dies gilt umso mehr, wenn mögliche Risiken der Energiepreissteigerungen, aber auch Zusatznutzen sowie externe Kosten und Nutzen von induzierten Innovationen mitberücksichtigt

werden. Die umfassenden Resultate werden in einer 20-seitigen Populärfassung in breiten Kreisen kommuniziert.

Im Projekt **Technologie-Monitoring** [6] werden exemplarisch motorische Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (100-400kW_{el}), Brennstoffzellenheizgeräte für Ein- und Mehrfamilienhäuser, Luft- und Wasserwärmepumpen für Einfamilienhäuser sowie Hochleistungswärmedämmung untersucht. Dank der vertieften Analyse der bisherigen Entwicklung konnten die wesentlichen Einflussfaktoren ermittelt werden. Es zeigte sich, dass Kostenreduktionen nicht nur durch technologische Fortschritte bestimmt sind, sondern auch ökonomische Faktoren wie zum Beispiel Markttransparenz einen entscheidenden Einfluss auf die Preisbildung haben. Bei bereits kommerziell verfügbaren Technologien, kann die künftige Entwicklung mit den massgebenden Einflussgrössen auf einige Kernfaktoren konzentriert und mit einiger Sicherheit für die nächsten 10 Jahre ermittelt werden. Hingegen ist es für neue Technologien wie zum Beispiel Brennstoffzellenheizgeräte, welche noch nicht kommerziell angeboten werden, um einiges schwieriger, mit angemessener Sicherheit Aussagen zu machen. Insgesamt können wertvolle Erkenntnisse für den Einsatz der knappen öffentlichen Mittel für eine effiziente Förderungspolitik abgeleitet werden:

Konkret sind für **motorische Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen** (WKK-Anlagen) die Stromgestehungskosten zwischen 1990 und 2000 mit ca. 40% drastisch gesunken. Sie liegen damit unter den Bezugskosten für gleichwertige Elektrizität. Bis etwa ins Jahr 2000 hat die Entwicklung der motorischen WKK einen kaum erwarteten Aufschwung erfahren. Bis zum Jahr 2010 ist eine weitere Reduktion der realen Stromgestehungskosten von 5 bis 20% zu erwarten. Bei den **Luft- und Wasserwärmepumpen** für Einfamilienhäuser ist eine Preisreduktion von ca. 20 bis 25 % der Wärmegehungskosten festzustellen, womit diese gegenüber Ölheizungen als konkurrenzfähig betrachtet werden können. In den nächsten 10 Jahren ist eine weitere Reduktion der Wärmegehungskosten von 10 bis 20 % zu erwarten. Für die **Brennstoffzellenheizgeräte** und die **Hochleistungswärmedämmung** ist ebenfalls mit weiteren Kostenreduktionen zu rechnen. Diese müssen aber in einem bedeutenden Ausmass eintreffen, wenn sie gegenüber Konkurrenzwendungen bestehen sollen.

Die Studie **zukünftige Bedeutung von Klein-WKK-Anlagen** (1 bis 1000 kW_{el}) [7] zeigt die Reduktion der Stromgestehungskosten in den 90er Jahren von über 40 % auf. Bis 2010 kann für

Kleinanlagen mit einer Leistung von weniger als 50 kW_{el} eine weitere spürbare Reduktion erwartet werden. Für die nächsten 10 Jahre lassen vor allem die Mikro-Gasturbinen ein enormes Kostensenkungspotenzial erwarten. Es ist als sehr wahrscheinlich zu betrachten, dass für Mikro-Gasturbinen die Stromgestehungskosten im Leistungsbereich von 25 bis 100 kW_{el} stark sinken werden. Hingegen ist die Entwicklung für Brennstoffzellen bis ins Jahr 2010 mit grossen Unsicherheiten verbunden. Insgesamt kann die Stromproduktion mit der WKK-Technologie in den nächsten Jahren eine erhebliche Zunahme um 140 % auf 2500 GWh erbringen. Diese Zunahme wird durch ein weiteres Wachstum der motorischen WKK und die Markteinführung von Mikro-Gasturbinen bis 200 kW_{el} ermöglicht.

Das Projekt **Erhebung des Erneuerungsverhaltens bei Wohngebäuden** [8] will das effektive Investitionsverhalten von Hauseigentümern in den letzten 15 Jahren erfassen. Damit sollen forcierte Wärmedämmszenarien wie auch Szenarien für den vermehrten Einsatz von erneuerbaren Energien auf ein sicheres Fundament gestellt werden. Die bisherigen Ergebnisse können als plausibel bezeichnet werden: Es hat sich herausgestellt, dass die energetisch wirksamen Erneuerungen für einige Bereiche über den erwarteten Vorstellungen liegen. So sind in den letzten 15 Jahren z.B. 15 bis 40 % energetische Erneuerungen bei Fassaden und rund 50 % im Fensterbereich vorgenommen worden.

Das neu gestartete Projekt **Versorgung mit fossilen Treib- und Brennstoffen** [9] geht der Frage nach, wie gross die Ressourcen und Reserven von fossilen Treib- und Brennstoffen weltweit eingeschätzt werden können. Weitere Fragen sind: Zu welchen Kosten können sie gefördert werden? Wo lagern welche Mengen? Wie entwickelt sich die Nachfrage nach fossilen Treib- und Brennstoffen? Welches sind die Implikationen einer zukünftigen Verknappung? Im Rahmen der durchgeführten Literaturanalyse konnten bisher erste Arbeitshypothesen formuliert werden.

Mit dem Projekt **Windenergie und schweizerischer Wasserkraftpark** [10] wird untersucht, wie sich die Veränderungen im europäischen Stromangebot beim zu erwartenden vermehrten Windkraftangebot einstellen. Der Stellenwert von Spitzenstrom, Regulierungsenergie im Rahmen der voraussichtlichen Angebotskonstellation soll untersucht werden. Ebenfalls sind Chancen zu untersuchen, die sich daraus für die schweizerische Wasserkraft ergeben.

Ausgehend von der Tatsache, dass Energieeffizienzmassnahmen im Gebäudebereich unwirt-

schaftlich sein können, wird im Projekt **Direkte und indirekte Zusatznutzen bei energieeffizienten Wohnbauten** [11] der Frage nachgegangen, inwiefern *Secondary Benefits* bestehen. Mit anderen Worten: Es soll das Ausmass von möglichen Zusatznutzen im Wohnbaubereich erfasst und empirisch untersucht werden. Mit der im Sommer 2002 angelaufenen Studie sollen erstens direkte und indirekte Zusatznutzen von Energieeffizienzinvestitionen bei Neubauten und Wohngebäudeerneuerungen identifiziert werden. Als Beispiele sind etwa zu nennen: Aussenlärmimissionen, bessere Raumluftqualität, höherer Wohnkomfort, höhere Behaglichkeit. Zweitens soll eine Quantifizierung und ökonomische Bewertung, das heisst eine Monetarisierung der Zusatznutzen vorgenommen werden, wobei dies durch die zwei Methoden der *Conjoint-Analyse* sowie mit dem *Hedonistic-Pricing* geschieht. In einem dritten Schritt werden Kommunikations- und Marketingempfehlungen für unterschiedliche öffentliche und private Akteure auf dem Wohnungsmarkt abgeleitet.

Das Projekt **Energieeffiziente Fenster in der Schweiz – Status quo und Fördermöglichkeiten** [12] analysiert die Struktur- und Angebotsentwicklung des Fenstermarktes für die kommenden Jahre. Dabei findet ein weiterer Verdrängungswettbewerb mit sinkenden Preisen – vor allem durch das Ausscheiden von mittleren, gewerblichen Anbietern, statt. Holzfenster sind vom Marktrückgang am stärksten betroffen, während sich Holz-Metall-Fenster am Markt sehr gut behaupten. Käufer von Fenstern (Architekten, Bauträger, Planer, Entscheidungsträger von Wohnbaugenossenschaften) kennen zu rund einem Drittel Zertifikate und die Zertifizierungsstellen für besonders energieeffiziente Fenster. Das *Minergie*-Label ist erst bei 6 % aller Befragten bekannt. Immerhin ist bei 70 % der Entscheidungsträger ein recht hohes Wissen über energieeffiziente Fenster vorhanden (Kenntnis Wärmedurchgangskoeffizient für Fenster). Nurmehr *Minergie* zertifizierte Fenster würden eingesetzt, wenn gesetzliche Verpflichtungen oder eine öffentliche Förderung durchgesetzt würde. Ein noch etwas grösserer Anteil der Befragten (74 %) gibt an, dass sie ihr Verhalten bei einer positiven Kosten-Nutzenrechnung bezüglich energieeffizienter Fenster ändern würde. Es bestätigt sich damit ein international bekannter Trend, dass energieeffiziente Fenster eher nachgefragt werden, wenn detaillierte Informationen über positive pekuniäre Wirkungen vorliegen.

MASSNAHMEN

Im Projekt **Marktchancen und Markthindernisse der thermischen Solarenergie** [13] wird davon ausgegangen, dass diese für die Wassererwärmung bei Einfamilienhäusern ein beträchtliches Marktpotenzial aufweist. Rund 600'000 Einfamilienhausbesitzerinnen und –besitzer sind dabei die wichtigste Zielgruppe. Im Rahmen einer repräsentativen Befragung der derzeitigen und künftigen EinfamilienhausbesitzerInnen in der Deutschschweiz und in der Romandie sowie einer Expertenbefragung stellte sich heraus, dass ein Drittel der derzeitigen und zwei Drittel der künftigen EinfamilienhausbesitzerInnen sich den Einbau einer Solaranlage vorstellen können. Bei den Eigentümern von Einfamilienhäusern käme dies bei einer Gebäude- oder Heizungssanierung aber auch beim Ersatz eines Elektroboilers am ehesten in Frage. Ein zusätzlicher Absatz von Solar-Kompaktanlagen müsste also diese Investitionsfenster nutzen. Eine vermehrte Ausschöpfung der Marktpotenziale würde verlangen, dass bei den Haushalten Wissensdefizite reduziert und Fehlurteile über Kosten, Leistung, Zuverlässigkeit und Umtriebe beim Einbau einer Solar-Kompaktanlage korrigiert würden. Solar-Kompaktanlagen weisen als Produkt kein klares Profil auf, wobei Sonnenenergie grundsätzlich als grosser Sympathieträger gilt. Noch grössere Hindernisse sind auf der Anbieterseite zu überwinden: So ist es für potenzielle Interessenten mühsam, an kompetente, neutrale Fachberater zu gelangen. Architekten und Installateure begnügen sich meistens mit dem Einbau von konventionellen Anlagen. Ihnen fehlen zudem häufig die fachlichen Kenntnisse und die Organisation, um die Gesamtgarantie für eine Anlage zu übernehmen. Grundsätzlich vorhandene Investitionsfenster werden damit meistens verpasst. Als wichtigste Massnahmen werden vorgeschlagen: die klare Positionierung der Solar-Kompaktanlagen, die Aufklärung der Interessenten, Aufbau und Bekanntmachung einer Infrastruktur für professionelle Berater, Installations- und Garantieleistungen, die Integration der Kompaktanlagen in die Vertriebskanäle von Heizungen und Elektroboilern und damit letztlich die Mobilisierung der gesamten Bau-, Installations- und Heizungsbranche. Für grössere Mietobjekte ist der Einsatz der Solarthermie zur Wasservorwärmung bereits heute technisch ausgereift und wirtschaftlich. Um den Einsatz der Solarthermie zu steigern, muss zunächst die energetische Sanierung des Gebäudebestandes in Gang kommen, die durch die Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen und etwa durch leistungsbezogene Nebenkostenabrechnungen pro Quadratmeter unterstützt werden.

Mit dem Projekt **Marketing- und PR-Strategie-Minergie-Passivhaus** [14] konnte ein wichtiger Beitrag für die Weiterentwicklung der von allen Kantonen und vom Bund getragenen Marke *Minergie* geschaffen werden: Es stellte sich die Frage, ob und wie der deutsche *Passivhaus*-Standard als schweizerischer Standard im Rahmen des *Minergie*-Marketingkonzeptes allenfalls aufgenommen und integriert werden soll. Mit einer Marktumfrage war zu klären, wie der *Passivhaus*-Standard im Rahmen der *Minergie*-Strategie vermarktet werden kann, ohne die laufende Markteinführung des *Minergie*-Standard-Produktes zu gefährden. Die Untersuchung führte zu einer Reihe von Empfehlungen, die inzwischen grösstenteils umgesetzt worden sind. Die Integration des *Passivhaus*-Standards (inzwischen in der Schweiz als *Minergie-P*-Standard bezeichnet) wird unter der Dachmarke *Minergie* als möglich erachtet, wenn verschiedene Voraussetzungen erfüllt sind, wie Profilierung von *Minergie* als Dachmarke, klare Produktebenennung, Vertiefung der Qualitätssicherung, der Stärkung des Marketings für *Minergie*-Standard gegen aussen und klare Kommunikation des *Minergie-P*-Standard.

Das Hauptziel der Studie Förderung von **Energieeffizienz in Unternehmen – Förderinstrumente mit und ohne Bezug auf Umweltmanagementsysteme** [15] war die Entwicklung geeigneter Instrumente zur Förderung von Energieeffizienz in Unternehmen (vor allem KMU aus nicht energieintensiven Branchen) mit und ohne Umweltmanagementsystemen (UMS). Dabei wurden in einem ersten Schritt die wichtigsten Hemmnisse und Erfolgsfaktoren für die Realisierung von Energieeffizienzprojekten in Unternehmen untersucht. Als Erfolgsfaktoren werden genannt: Erstens Umweltbewusstsein mit Commitment und Fähigkeit der Unternehmensführung, diese intern überzeugend zu kommunizieren, zweitens Kostensenkungspotenziale bzw. Rentabilität von Energieeffizienzprojekten. Bei den Hemmnissen stehen vier Faktoren im Vordergrund: (1) die geringe Bedeutung von Energiekosten im Vergleich zum Gesamtaufwand des Unternehmens, (2) relativ grosse Investitionskosten für Projekte, deren Bedeutung für das Unternehmen nicht strategisch ist und deren Wirtschaftlichkeit zudem oft fraglich ist, (3) fehlende Kenntnis bzw. Informationen über konkrete Einsparmöglichkeiten, (4) verbesserungsfähige Motivation des Personals. Als erfolgversprechendste Massnahme wurde das Instrument *Leitfaden/EDV-tool* vertieft behandelt. Es werden konkrete Umsetzungsschritte aufgezeigt. Bei den Akkreditierungs- und Zertifizierungsstellen sowie auch den meisten ISO-14001 zertifizierten oder zu zertifizierende Unternehmen

besteht ein grosses Interesse an einer Integration eines EDV-tools für vermehrte Energieeffizienz. Wohl wird dem Energiebereich gegenüber anderen Bereichen (z.B. Abfallaufkommen, Materialverbrauch, produktionspezifische Umweltbelastungen, Einsatz Gefahrenstoffe) eine höhere Bedeutung beigemessen. Es wird aber immer nur die gesamte Umweltbelastung eines Unternehmens bewertet, was eine Hervorhebung eines spezifischen Umweltaspektes erschwert. Zudem fehlt im Rahmen von ISO 14001 ein inhaltlicher ökologischer Leistungsmassstab, mit dem eine Messlatte für eine hinreichende Berücksichtigung von Energieeffizienz definiert werden könnte. Es ist nun Sache privater Träger, beispielsweise der Energie Agentur der Wirtschaft, die konkrete Umsetzung eines Leitfadens bzw. eines EDV-tools aufgrund der geleisteten Vorarbeiten konkret an die Hand zu nehmen.

Das Projekt **Optimierung Energievollzug und Anwendung der SIA-Normen Gebäude** [16] untersucht die Leistungsfähigkeit des Vollzugs der Energiegesetzgebung und den Stellenwert der Normen im Planungs-, Bau- und Vollzugsablauf. Dabei sollen Gründe für Vollzugsdefizite analysiert und Verbesserungsvorschläge unter Einbezug von Aspekten des Haftungsrechtes vorgenommen werden. Es wird als fraglich bezeichnet, ob mit den vorhandenen "polizeilichen" Massnahmen die Defizite im Vollzug behoben werden können. Dort wo bedeutende Vollzugsmengen sichtbar sind, fehlt es nämlich am politischen Willen und an den personellen Mitteln der Vollzugsbehörden. Die vorhandenen Instrumente wären für einen wirksamen Vollzug eigentlich ausreichend, auch wenn sie teilweise zu komplizierten Verfahren führen würden. Die Autoren schlagen vor, den energetischen Standard von Gebäuden mit weiteren freiwilligen Massnahmen zu verbessern wie beispielsweise vermehrte Beratung und Durchsetzung des *Minergie*-Standards etc. Weiter sollten vor allem kleinere Gemeinden von Vollzugsaufgaben befreit bzw. entlastet werden, wobei ein regionalisierter Vollzug zu einer Verbesserung beitragen könnte. Auch private Kontrollen, deren Qualität durch den Kanton überwacht und gesteuert wird (beispielsweise Entzug der Befähigung von privaten Kontrolleuren sowie Bussen), sind möglich. Die Gemeinden würden sich nur noch auf die Prüfung der Konformität mit der Bau- und Zonenordnung sowie mit äusserlichen Aspekten von Bauvorhaben (Ortsbild) konzentrieren. Weiter sollten der Bauherrschaft einfache energieeffiziente Standards sowie einfache Checklisten (*Wie komme ich zu einem energieeffizienten Gebäude?*) vermehrt kommuniziert werden. Bei grösseren Bauvor-

haben sollten die Vollzugsbehörden möglichst frühzeitig über das Vorhaben informiert werden und die Bauherrschaft aktiv beraten bzw. eine Beratung vermitteln können. In jedem Fall bleibt die Optimierung der energetischen Qualität der Bauvorhaben angesichts der zahlreichen Akteure eine komplexe Aufgabe. Es braucht in erster Linie motivierte und gut ausgebildete Planungsteams, die die Bauherrschaft in den Aspekten der Nachhaltigkeit wirksam unterstützen und beraten können. Die Baubehörden können sicherstellen, dass die gesetzlichen Anforderungen mindestens eingehalten werden. Damit diese auch deutlich unterschritten werden, braucht es aber Motivations- und Überzeugungsarbeit durch Bund, Kantone und Fachverbände.

Im Projekt **Wohnbauförderung und Energieeffizienz** [17] wird eine Motion des Nationalrats aufgenommen, welche verlangt, *Massnahmen zu ergreifen, damit der Minergie-Standard im Gebäudebereich als Ziel verfolgt wird; dies für alle Bundesbauten und für Bauten, die vom Bund subventioniert werden.* Mit dem Projekt sollen die Möglichkeiten der Umsetzung in Bezug auf die Wohnraumförderung aufgezeigt werden. Es sind dabei folgende Eckwerte festgehalten worden: Beim subventionierten Neubau ist der *Minergie-Standard* verbindlich zu verlangen, bei Sanierungen im Rahmen der Wohnbauförderung sind geeignete Anreize zu schaffen. Beim Erwerb nach Wohnbauförderungsgesetz sind weitergehende Massnahmen auszuschliessen, da diese Fälle ohnehin nicht zahlreich sind. Die Finanzierung allfälliger Mehrkosten soll teilweise durch die Investoren und teilweise durch den Bund erfolgen.

Der **Basler Stromspar-Fonds** [18] ist seit vier Jahren in Kraft. Es geht dabei um eine Lenkungsabgabe auf Strom, wobei die Einnahmen an die Haushalte und Unternehmen voll rückerstattet werden. Das Vorhaben hat für die Schweiz Pilotcharakter: Es wird zum ersten Mal im Energiebereich eine staatsquotenneutrale Lenkungsabgabe auf Strom umgesetzt. Mit einer Evaluation soll nun abgeklärt werden, welche Wirkungen von der staatsquotenneutralen Lenkungsabgabe im Strombereich ausgehen (beispielsweise Beschäftigung, Innovationskraft etc.). Die ursprünglich gesetzten Ziele sind zu überprüfen. Weiter soll analysiert werden, inwiefern das Basler Stromspar-Fonds-Modell auf andere Gemeinden, Städte und Kantone übertragen werden kann. Gleichzeitig sollen Verbesserungsvorschläge für die Konzeption und den Vollzug des Basler Stromspar-Fonds entwickelt und Folgerungen für andere Abgaben gezogen werden. Die Analysen

werden qualitativ und soweit möglich quantitativ an die Hand genommen. Methodisch werden Expertengespräche, eine telefonische Befragung bei je 300 Haushalten und Unternehmen sowie eine detaillierte Auswertung der Basler Strukturdaten (Stromverbrauchsdaten, Wertschöpfungsdaten etc.) vorgenommen.

Das Projekt **Planungs- und Bauinstrumente** [19] soll analysieren, inwiefern baurechtliche und raumplanerische Massnahmen zu einer Steigerung des rationellen Energieeinsatzes bei Gebäuden sowie der vermehrten Anwendung von erneuerbaren Energien führen können. Die möglichen Instrumente sollen aufgezeigt werden. Der Stand des Einsatzes von Massnahmen inklusive Effekte ist darzulegen. Stärken und Schwächen von einzelnen Massnahmen des Bau- und Planungsbereiches zugunsten von vermehrter Energieeffizienz und erneuerbaren Energien sind zu untersuchen. Naturgemäss sind die planungs- und baurechtlichen Aspekte auf einen mittel- bis längerfristigen Zeithorizont ausgerichtet. Letztlich ist ihr Beitrag an eine Gesellschaft mit nur 1 bis 2 Tonnen CO₂-Emissionen pro Kopf von Interesse.

Ausgangspunkt für das Projekt **Neubauen und Renovieren von Hotels im Minergiestandard** [20] ist die oben erwähnte Minergie-Motion. Konkret soll abgeklärt werden, inwiefern die Anliegen der Energieeffizienz und die Anwendung von erneuerbaren Energien im Rahmen der staatlichen Hotelförderung durch die schweizerische Gesellschaft für Hotelkredit (SGH) in den nächsten Jahren umgesetzt werden können. Es sollen dabei im Dialog mit den verschiedenen involvierten Akteurguppen praxisorientierte Vorschläge erarbeitet werden, die aufzeigen, wie dem *Minergie-Standard* in der Saison-Hotellerie zum Durchbruch verholfen werden kann. Dabei sind u.a. direkte Kosten und Nutzen, aber auch Zusatznutzen, inklusive der Beachtung von externen Kosten, in die Überlegungen einzubeziehen.

Die Studie **Energieeffizienz und erneuerbare Energien** [21] ist als Pilotprojekt in der **Region Surselva** angelegt. Sie soll langfristige Perspektiven entwickeln, die in einer Bergregion schrittweise umgesetzt werden können. Dabei ist das Potenzial für eine Energiepolitik mit einer deutlichen Absenkung der CO₂-Emissionen, der Förderung der Energieeffizienz und der erneuerbaren Energien darzulegen. Weiter sind Hindernisse, Hemmnisse und Erfolgsfaktoren aufzuzeigen. Neben dem Kanton Graubünden beteiligen sich an der Studie der Gemeindeverband Surselva und die *aurax AG* (Stromproduzent und Stromversorger in der Surselva).

INTERDEPENDENZEN

Mit der Studie *Conception d'une procédure d'aide à la décision matière de politique énergétique basées sur des critères et des indicateurs de développement durable* [22] werden Arbeitsinstrumente entwickelt, um den Fortschritt bezüglich Nachhaltigkeit von Energiesystemen festzustellen oder Aktionen zu beurteilen, welche verschiedene Energieziele erreichen sollen. Dabei werden vier verschiedene Methoden untersucht: Die erste ist inspiriert durch Aggregationsmethoden der statistischen Ökonomie; die zweite erlaubt die Aggregation zeitlicher oder räumlicher Entwicklungen. Die zwei weiteren Methoden erlauben es, eine grosse Anzahl an Indikatoren zu untersuchen. Die Methoden werden anhand von international publizierten Energiedaten der IEA im Bereich Gebäudebereich getestet, und die Grenzen der verschiedenen Methoden werden ausgeleuchtet.

Das Projekt *Vision 2050 – Nachhaltige Energieversorgung und -nutzung* [23] ist in Zusammenarbeit mit der CORE lanciert worden. Es handelt sich um eine Vorstudie, in welcher der Nutzen und die Machbarkeit einer Analyse für eine nachhaltige Energieversorgung und -nutzung mit Zeithorizont bis 2050 dargelegt werden soll. Dabei sind verschiedene Teilbereiche wie internationale und nationale Energiepolitik, technische Potenziale, Akzeptanz, der Einsatz von Modellen im Hinblick auf Forschungslücken und neue Erkenntnisfelder zu untersuchen. Zudem soll ein Set von möglichen ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Indikatoren für ein nachhaltiges Energiesystem entwickelt werden, wobei gleichzeitig auf die wichtigsten Zielkonflikte hingewiesen werden soll. Anfangs 2003 werden die eingeleiteten Untersuchungen vertieft und bis im Sommer 2003 ist eine Ausschreibung – zumindest eines ersten Teils – der Hauptstudie vorgesehen.

Das Projekt *Cluster Energie – Chancen und Möglichkeiten* [24] will die Leistungsfähigkeit

der in jüngster Zeit entwickelten Cluster-Theorien analysieren und auf den Energiebereich übertragen. Wie laufen Innovationsprozesse? Wie lässt sich die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen verbessern? Die Analysen ausländischer Cluster im Energiebereich sollen Stärken und Schwächen aufzeigen und Lehren für die Schweiz liefern. In einem weiteren Schritt sind aufgrund der Cluster-Analysen Ergänzungen zur bisherigen schweizerischen Energiepolitik zu entwickeln; wenn möglich sind Vorschläge für eine verbesserte Energiepolitik darzulegen.

MARTKORDNUNGEN

Das Ziel des Projektes *Dezentrale Stromversorgung – Optimierungschancen* [25] soll die Möglichkeiten und Auswirkungen einer verstärkt netzunabhängigen Stromversorgung in dezentralen Gebieten prüfen und Vorschläge für Umsetzungsmassnahmen unterbreiten. Nach einer Klärung des Begriffs *dezentrale Gebiete für die Stromversorgung* sind im Rahmen von 19 Fallbeispielen empirische Daten zu den Kosten erhoben worden. Als vorläufiges Ergebnis zeigt sich, dass unter heutigen Kostenverhältnissen neue dezentrale Produktionstechnologien - auch bei sehr hohen Kosten der netzabhängigen dezentralen Stromproduktion, das heisst bis rund 2 Fr./kWh, nur in wenigen Fällen kostengünstiger sind. Dabei hat sich die Distanz zur nächsten bestehenden Mittelspannungsleitung als wichtigste Grösse herauskristallisiert, um abzuschätzen, ob dezentrale Lösungen als wirtschaftliche Alternative zur netzabhängigen Stromversorgung in Frage kommen.

Das Projekt *Réseaux de distributions* [26] stellt eine Ergänzung und Weiterführung zum vorgenannten Projekt dar. Es wird mit den zwei Fallstudien Val Bedretto im Kanton Tessin und der Region Escoteaux im Wallis ergänzt. Die Ergebnisse sind auf Frühjahr 2003 vorgesehen.

Nationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des Forschungsprogramms *Energiewirtschaftliche Grundlagen* wird eine intensive Zusammenarbeit mit privaten Forschungsstellen, Universitäten, Fachhochschulen und Instituten gepflegt. Auf eine hohe Vernetzung unter den Forschungsstellen wird grossen Wert gelegt. Zentrales Anliegen ist der Einbezug und die Zusammenarbeit mit den Kantonen, insbesondere den kantonalen

Energiefachstellen und den interessierten Fachverbänden in den Bereichen Stromversorgung und Bauen. Im vergangenen Jahr sind alle Projekte des Forschungsprogrammes von speziell eingesetzten Begleitgruppen betreut worden. Damit kann viel 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 Projekte 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 2002 und Ausblick 2003

Im Jahr 2002 sind die Bereiche Kosten und Wirtschaftlichkeit von Energiesystemen sowie die Analyse von einzelnen Massnahmen intensiv und mit grossem Erfolg angegangen worden. Zum Beispiel dank des eingeleiteten Technologie-Monitorings konnten neue, teilweise überraschende Erkenntnisse gewonnen werden. Eine sehr viel klarere Einschätzung von Mehrkosten, Nutzen, Zusatznutzen von einzelnen Energiesystemen ist geleistet worden. Im Bereich *Massnahmen* haben die Untersuchungen bereits nachweislich positive Impulse auf die Energiepraxis ausgelöst (z.B. In-

tegration von *Minergie-P*, vorbildliche Umsetzung der Studie Thermische Solaranlagen im Rahmen der Kampagne *solarbegeistert*). Auf eine weiter verbesserte Umsetzung der Ergebnisse ist aber ein noch grösseres Gewicht zu legen. Im Jahr 2003 sollen die Schwerpunkte *Kosten und Wirtschaftlichkeit* sowie die *Analyse von Massnahmen* mit möglichst praxisorientierten Fragestellungen intensiv weitergeführt werden. Ebenfalls ist das – langfristige – Projekt *Nachhaltige Energieversorgung und -nutzung* spätestens im Sommer 2003 mit der Hauptstudie zu starten.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2002 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

Sämtliche Jahres- und Schlussberichte können unter www.ewg-bfe.ch heruntergeladen werden.

- [1] S. Frauenfelder (frauenfelder@linder-kom.ch), Linder Kommunikation, Zürich: **Indikatoren zu ausgewählten kantonalen Energiemassnahmen** (SB).
- [2] M. Keller (mario.keller@infras.ch), Infrac AG, Bern: **CO₂-Reduktion durch Beeinflussung der Treibstoffpreise** (SB).
- [3] W. Ott (walter.ott@econcept.ch), Benno Seiler (benno.seiler@econcept.ch), econcept, Zürich, A. Binz (a.binz@fhbb.ch), FHBB-Institut für Energie, Muttenz: **Neu Bauen statt Sanieren** (SB).
- [4] P. Zweifel & Y. Schneider (yschneider@soi.unizh.ch), Sozialökonomisches Institut der Universität Zürich: **Marginale Zahlungsbereitschaft für eine erhöhte Internalisierung des Risikos von Kernkraftwerken** (SB).
- [5] E. Jochem & M. Jakob (martin.jakob@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, Zürich; K. Christen, P. Stocker PSI, Zürich: **Grenzkosten bei forcierten Energiesparmassnahmen** (SB).
- [6] H.P. Eicher & R. Rigassi (reto.rigassi@eicher-pauli.ch), Eicher+Pauli, Liestal; W. Ott, econcept, Zürich: **Technologie-Monitoring** (SB).
- [7] H.P. Eicher & Reto Rigassi (reto.rigassi@eicherpauli.ch), Eicher+Pauli, Liestal: **Zukünftige Marktbedeutung von Klein-WKK-Anlagen** (SB).

- [8] E. Jochem & M. Jakob (martin.jakob@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, Zürich: **Erhebung des Erneuerungsverhaltens bei Wohngebäuden** (SB).
- [9] W. Kägi, E. Staehelin-Witt, M. Schäfli & U. Eichenberger (wolfram.kaegi@bss-basel.ch), B.S.S., Basel: **Versorgung mit fossilen Treib- und Brennstoffen** (JB) www.bss-basel.ch
- [10] W. Ott (walter.ott@econcept.ch), econcept, Zürich: **Windenergie und Schweizerischer Wasserkraftpark** (JB). www.econcept.ch
- [11] M. Baur (martin.baur@econcept.ch), econcept, Zürich: **Direkte und indirekte Zusatznutzen bei energieeffizienten Wohnbauten** (JB). www.econcept.ch
- [12] F. Lehner & M. Bergant (martin.bergant@interconnetionconsulting.com), Interconnection Consulting, Wien: **Energieeffiziente Fenster in der Schweiz** (JB).
- [13] F. Gerheuser (frohmut.gerheuser@smile.ch), Polis, Brugg: **Marktchancen und Markthindernisse der thermischen Solarenergie** (SB).
- [14] S. Frauenfelder (frauenfelder@linder-kom.ch), Linder Kommunikation, Zürich: **Marketing- und PR-Strategie Minergie – Passivhaus** (SB).
- [15] G. Beltrani & O. Schelske (guido.beltrani@ebp.ch), Ernst Basler + Partner, Zürich: **Energieeffizienz in Unternehmen – Förderinstrumente mit und ohne Bezug auf Umweltmanagementsysteme** (SB).
- [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). www.econcept.ch
- [17] P. Marti, I. Sidler & Ch. Brun (peter.marti@metron.ch), Metron, Brugg: **Wohnbauförderung und Energieeffizienz** (JB).
- [18] R. Iten (rolf.iten@infras.ch), Infrac/PLAUT, Zürich: **Evaluation Basler Stromspar-Fonds** (JB).
- [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** (JB). www.planair.ch
- [20] J. Kuster & P. Plaz (info@hanserconsulting.ch), BHP Hanser & Partner AG, Zürich: **Neubauen und Renovieren von Hotels im Minerghostandard** (JB). www.hanserconsulting.ch
- [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** (JB).
- [22] F. Carlevaro, M. Garbely & St. Genoud (fabrizio.carlevaro@metri.unige.ch), CEPE, Genf: **Conception d'une procédure d'aide à la décision en matière de politique énergétique basée sur des critères et des indicateurs de développement durable** (SB).
- [23] 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** (JB).
- [24] S. Suter & A. Müller (suter@ecoplan.ch), Ecoplan, Bern; F. Ohler & L. Jörg, Technopolis, Wien: **Cluster Energie** (JB).
- [25] H. Sommer (sommer@ecoplan.ch), Ecoplan, Altdorf: **Dezentrale Stromversorgung – Optimierungschancen** (JB).
- [26] F. Romerio & B. Lachal (franco.romerio@cuepe.unige.ch, bernard.lachal@cuepe.unige.ch), CUEPE, Uni Genf: **Réseaux de distributions versus production distribuée** (JB).
- [27] R. Meier, M. Beck & P. Previdoli (Hrsg.) (2002): **Bauen, Sanieren, wirtschaftlich Investieren – Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit im Einklang**. 193 S. Zürich/Chur: Rüegger Verlag. ISBN-Nr. 3-7253-0731-8.

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'énergie 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

BRITE-EURAM & GROWTH	Basic Research in Industrial Technologies for Europe / European Research on Advanced Materials (4 th & 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
JOULE-THERMIE & EESD	Joint Opportunities for Unconventional or Long-term Energy supply & Energy, Environment and Sustainable Development (4 th & 5 th European Framework Programmes)
OECD / OCDE	Organisation for Economic Co-operation and Development

ENERGIE-FE&D-ORGANISATION / ORGANISATION DE LA RD&D ÉNERGÉTIQUE

	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 / Bâtiment	A. Eckmanns	M. Zimmermann	
	Verkehr / Transports	M. Pulfer	M. Pulfer	
	Batterien, Supercaps / Batteries, supercaps			
	Elektrizitätsspeicherung & -transport / Stockage et transport de l'électricité	F. Frey	R. Brüniger	
	Elektrizitätsnutzung (Geräte) / Utilisation de l'électricité (appareils)			
	Wärme-Kraft-Koppelung (ohne Brennstoffzellen) / Couplage chaleur-force (sans les piles à combustible)	F. Rognon	T. Kopp	M. Ehrbar
	Verbrennung / Combustion	A. Hintermann	A. Hintermann	
	Brennstoffzellen / Piles à combustible			
	Prozesse (in Industrie, Gewerbe, Landwirtschaft,..) inkl. Abwärme / Procédés (dans l'industrie, les arts et métiers, l'agriculture,..) y compris les rejets de chaleur	M. Stettler	M. Stettler	
II. Erneuerbare Energien / Sources d'énergie renouvelables	Solarwärmespeicherung / Stockage de la chaleur solaire	U. Wolfer	J.-C. Hadorn	
	Solarwärme / Énergie solaire thermique		J.-C. Hadorn	P. Renaud
	Photovoltaik / Photovoltaïque		S. Nowak	
	Solararchitektur / Architecture solaire	A. Eckmanns	M. Zimmermann	
	Solarchemie inkl. Wasserstoff / Chimie solaire y compris l'hydrogène	A. Hintermann	A. Reller	
	Umgebungswärme (Wärmepumpen) / Chaleur ambiante (pompes à chaleur)	F. Rognon	T. Kopp	M. Ehrbar
	Biomasse (ohne Holz) / Biomasse (sans le bois)	B. Guggisberg	B. Guggisberg	B. Guggisberg
	Kleinwasserkraftwerke / Force hydraulique			H. P. Leutwiler
	Holz / Bois	D. Binggeli	D. Binggeli	
	Geothermie / Géothermie	M. Geissmann	H. L. Gorhan	
	Wind / Énergie éolienne		R. Horbaty	
III. Kernenergie / Énergie nucléaire	Kerntechnik und nukleare Sicherheit / Technique et sécurité nucléaire	C. de Reyff	J. P. Hosemann	—
	Regulatorische Sicherheitsforschung / Recherche réglementaire en sécurité nucléaire		S. Chakraborty	—
	Kernfusion / Fusion nucléaire		J.-F. Conscience	—
IV. Energiewirtschaftliche Grundlagen / Fondements de l'économie énergétique	Energiepolitik / Politique énergétique	L. Gutzwiller	R. Meier	
	Ökonomie, Gesellschaft, Umwelt / Économie, société, environnement			
	Technologie-Transfer / Transferts technologiques	A. Gut, C. de Reyff, G. Schriber		

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 29

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

Sabyasachy Chakraborty

HSK, 5232 Villigen - HSK
 Tel. 056 310 39 36 – Fax : 056 310 39 95
 E-mail : chakraborty@hsk.psi.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, 9470 Buchs
 Tel. 081 755 33 96 – Fax : 081 756 54 34
 E-mail : max.ehrbar@ntb.ch

Harald L. Gorhan

EWE, Hardturmstr. 161, 8037 Zürich
 Tel. 01 355 55 55 – Fax : 01 355 55 56
 E-mail : harald.gorhan@ewe.ch

Jean-Christophe Hadorn

Hadorn Consulting, 1035 Bournens
 Tel. 021 732 13 20 – Fax : 021 732 13 20
 E-mail : jchadorn@swissonline.ch

Robert Horbaty

ENCO, Postfach 235, 4435 Niederdorf
 Tel. 061 965 99 00 – Fax : 061 965 99 01
 E-mail : robert.horbaty@enco-gmbh.ch

J. Peter Hosemann

PSI, 5232 Villigen PSI
 Tel. 056 310 26 88 – Fax : 056 310 40 39
 E-mail : peter.hosemann@psi.ch

Thomas Kopp

FH Ostschweiz, Oberseestr. 10, 8640 Rapperswil
 Tel. 055 222 49 23 – Fax : 055 222 44 00
 E-mail : tkopp@hsr.ch

Hanspeter Leutwiler

ITECO, Postfach, 8910 Affoltern am Albis
 Tel. 01 762 18 70/18 – Fax : 01 762 18 15
 E-mail : pk@iteco.chmailto:iteco@iteco.ch

Ruedi Meier

Bolligenstr. 14b, 3006 Bern
 Tel. 031 332 49 10 – Fax/Tel. : 031 333 24 69
 E-mail : ruedimeier@bluewin.ch

Stefan Nowak

Nowak Energie & Technologie AG
 Waldweg 8, 1717 St. Ursen
 Tel. 026 494 00 30 – Fax : 026 494 00 34
 E-mail : stefan.nowak.net@bluewin.ch

Armin Reller

BTW, Schlachthofstr. 1, 8406 Winterthur
 Tel. 052 209 09 90 – Fax : 052 209 09 91
 E-mail : btwag@dialedunet.ch

c/o Universität Augsburg, Universitätsstr. 1,
 D - 86159 Augsburg
 Tel. 0049 8215983000 – Fax : 0049 8215983002
 E-mail : reller@physik.uni-augsburg.de

Pierre Renaud

PLANAIR, Crêt 108 A, 2314 La Sagne
 Tel. 032 931 88 40 – Fax : 032 933 88 50
 E-mail : info@planair.ch

Markus Zimmermann

EMPA-KWH, 8600 Dübendorf
 Tel. 01 823 41 78 – Fax : 01 821 62 44
 E-mail : mark.zimmermann@empa.ch

