

Energie-Forschung 2001 Recherche énergétique

Überblicksberichte der Programmleiter
Rapports de synthèse des chefs de programme

**Expo.02 demonstriert
Forschungsergebnisse**
zum Beispiel das grösste solar
getriebene Passagierschiff
der Welt, der Katamaran
Mobicat



**Des résultats
de la recherche
à Expo.02**
par exemple, le plus
grand bateau du monde
mû par l'énergie solaire,
le catamaran Mobicat

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

30.4.2002

Vorwort / Avant-propos		3
Fortschritte der Energieforschung 2001 / Survol de la recherche énergétique en 2001		4
Überblicksberichte der Programmleiter / Rapports de synthèse des chefs de programme		
RATIONELLE ENERGIE-NUTZUNG	Rationelle Energienutzung in Gebäuden	7
	Verkehr und Akkumulatoren	19
	Elektrizität	33
	Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung	43
	Brennstoffzellen	55
	Feuerung und Verbrennung	67
ERNEUERBARE ENERGIEN	Solaire actif: chaleur et stockage de chaleur	81
	Photovoltaik	97
	Solarchemie / Wasserstoff	111
	Biomasse	121
	Geothermie	133
	Windenergienutzung	147
	Kleinwasserkraftwerke	157
KERNENERGIE	Nukleare Sicherheit und Entsorgung	165
	Regulatorische Sicherheitsforschung	177
	Fusion thermonucléaire contrôlée	187
ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN	Energiewirtschaftliche Grundlagen	193
Anhänge / Annexes		
	Abkürzungen / Sigles	205
	Forschungs- und P+D-Organisation / Organisation de la Recherche et P+D	206
	Wichtige Adressen / Adresses importantes	207

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 einem 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 im Sommer 2002 erscheinende *Liste der Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprojekte im Bereich der Energie in der Schweiz 2000/2001* gibt die Aufwendungen der mit öffentlichen Mitteln finanzierten Energieforschung und eine detaillierte Zusammenstellung der Geldflüsse der Jahre 2000 und 2001 wieder.

Der vorliegende Band enthält die Jahres-Überblicksberichte der BFE-Programmlleiter. Darin sind die Fortschritte in denjenigen Projekten beschrieben, welche durch das BFE mitfinanziert worden sind. Enthalten sind aber auch Hinweise auf andere mit öffentlichen und privaten Mitteln durchgeführte Forschungsarbeiten.

Um ein möglichst grosses Publikum zu erreichen, kann der vorliegende Bericht sowie weitere Publikationen auch auf der Internetseite des BFE (www.energieschweiz.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) sind bei ENET (www.energieforschung.ch) zu beziehen. Das Reproduzieren von einzelnen Beiträgen ist – unter Angabe der Quelle – gestattet.

April 2002

BUNDESAMT FÜR ENERGIE

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* et de ceux pour les *installations pilotes et de démonstration* relève de responsabilités 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 2000/2001* • à paraître en été 2002 • inclut les moyens attribués par les pouvoirs publics à la recherche énergétique en 2000 et 2001, et donne aussi une revue détaillée des montants provenant des diverses sources de financement.

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 fait également mention des travaux de RD+D réalisés avec d'autres moyens publics et/ou privés.

Ce document est conçu pour être consulté sur le site Internet de l'OFEN, (www.suisse-energie.ch) et 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. La brochure imprimée se limite, elle, aux rapports de synthèse des programmes. Les rapports finals (RF) en version papier sont à commander auprès d'ENET (www.energieforschung.ch). La reproduction d'extraits du présent volume est autorisée, à condition d'indiquer la source.

Avril 2002

OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉNERGIE

FORTSCHRITTE DER ENERGIEFORSCHUNG 2001

SURVOL DE LA RECHERCHE ENERGETIQUE EN 2001

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

Die Forschung macht nur selten grosse Sprünge. Bedeutende neue Errungenschaften müssen in vielen Teilschritten erarbeitet werden. In diesem Sinn hat auch der beachtliche Einsatz der Wissenschaftler auf allen Gebieten zu grösseren und kleineren Erfolgen geführt. Es ist erfreulich, dass die gesetzten Jahresziele fast durchwegs erreicht worden sind. Als Auswahl wird im folgenden je ein neues Resultat von BFE-unterstützten Projekten aus den Programmen angeführt:

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG

In Zürich konnte das erste P+D-Projekt einer **Gebäudeanierung im Passivhaus-Standard** durchgeführt werden. Dabei waren auch denkmalpflegerische Auflagen zu berücksichtigen. Die begleitende Erfolgskontrolle wird bis 2003 zeigen, ob der Jahresheizwärmeverbrauch den sehr tiefen Standardwert von 15 kWh/a·m² erreicht.

Der **Grossversuch mit *veicoli elettrici leggeri* (VEL)** in Mendrisio wurde abgeschlossen. Die drei Hauptfragestellungen: Demonstration eines sinnvollen Einsatzes von VEL, Test verschiedener Fördermassnahmen und Beurteilung des Mobilitätsverhaltens sowie der Umweltwirkungen konnten schlüssig beantwortet werden. Ein auf den ganzen Kanton Tessin ausgeweitetes Nachfolgeprojekt startete am 1. Juli 2001.

Ein Projekt zur Untersuchung des **Einsparpotentials an Elektrizität bei den elektrischen Antrieben der Lonza AG in Visp** wurde gestartet. Aufgrund von vorsichtigen Schätzungen sind die Einsparmöglichkeiten 45-50 GWh/Jahr, was in etwa dem Stromverbrauch aller Haushalte der Stadt Neuenburg entspricht. Umsetzungsmassnahmen werden evaluiert.

Mit einer Feldtestanlage konnte in Lully (VD) erstmals der Betrieb eines **Brennstoffzellensystems** im kleinen Leistungsbereich des Typs *SOFC* der Sulzer Hexis AG (Winterthur) mit **Biogas als Brennstoff erfolgreich demonstriert** werden. Dies ist ein wichtiger Schritt in Richtung effizienter Einsatz erneuerbarer Brennstoffe für die Produktion von Strom und Wärme.

Dank je einer **Hochtemperaturdruckzelle** am PSI und an der ETHZ ist die Schweiz bei der Erforschung der **Grundlagen der motorischen Verbrennung** international konkurrenzfähig. Mit dieser Zelle können die Verbrennungsmechanismen in einem Diesel-Motorzyklus besser erforscht und im Hinblick auf Schadstoffreduktion und Wirkungsgraderhöhung optimiert werden. Bei der gegenwärtigen Diskussion über eine verstärkte Förderung von Dieselfahrzeugen in der Schweiz ist die Forschung hoch aktuell.

La recherche fait rarement de grands sauts; les nouvelles acquisitions d'importance sont réalisées en plusieurs étapes partielles. C'est en ce sens que l'engagement considérable des chercheurs dans tous les domaines de l'énergie a conduit à des succès plus ou moins grands. On peut se réjouir que les buts fixés pour l'année aient été presque tous atteints. Un choix de résultats acquis est présenté ici pour des projets soutenus par l'OFEN dans ses programmes.

UTILISATION RATIONNELLE DE L'ENERGIE

Une **rénovation de bâtiment** faite selon le standard de la **maison passive** s'est concrétisée en un projet P+D à Zurich. Un aspect à traiter a été celui de la conservation des monuments. D'ici à 2003, on saura si ce bâtiment atteint la valeur standard de chauffage de 15 kWh/a·m².

L'essai de grande envergure **VEL (*veicoli elettrici leggeri*)** s'est conclu à Mendrisio. Il a pu être répondu aux trois problématiques principales: démonstration d'un engagement d'une flottille de VEL, test de diverses mesures d'encouragement et examen du comportement de mobilité ainsi que de l'impact environnemental. Un projet subséquent a débuté le 1^{er} juillet 2001 pour s'étendre à tout le Tessin.

Un projet a été lancé pour examiner le **potentiel d'économie d'électricité pour des moteurs électriques de la Lonza SA, à Viège**. Au vu d'estimations préalables, ce potentiel d'économie s'élèverait à quelque 45 à 50 GWh/an, soit la consommation de tous les ménages d'une ville comme Neuchâtel. On évalue aussi des mesures de transfert.

À Lully (VD), un système de pile à combustible de faible puissance du type *SOFC* de Sulzer Hexis SA (Winterthur) a permis de démontrer avec succès sa mise en œuvre avec du **biogaz comme agent énergétique**. C'est là un pas décisif dans l'application de combustibles renouvelables pour la production de chaleur et d'électricité.

Grâce à une **cellule pressurisée à haute température** du PSI et de l'EPFZ, la Suisse s'est hissée à un niveau de concurrence internationale dans l'étude des **fondements de la carburation dans les moteurs**. Grâce à cette cellule les mécanismes de carburation peuvent être examinés lors du cycle d'un moteur Diesel et optimisés en ce qui touche à la réduction des émissions polluantes et à l'élévation du rendement. Cette recherche est très actuelle du fait de la discussion en cours sur un encouragement accru des véhicules Diesel.

ERNEUERBARE ENERGIEN

Eine **europäische Norm für Tests** von *Thermal solar systems and components • Factory made systems* wurde mit aktiver Schweizer Beteiligung im Rahmen der IEA entwickelt. Am SPF in Rapperswil können nun Hersteller von kombinierten Systemen aus aller Welt ihre Anlagen nach dieser Norm zertifizieren lassen.

Bei **Wechselrichtern und Modulintegrations- und Modulbefestigungssysteme von Photovoltaikzellen** haben sich die Schweizer Systeme **SOLRIF** und **AluTec** bei den erfolgreichsten P+D-Entwicklungen der letzten Jahre eingereiht. So konnten bis Ende 2001 europaweit **SOLRIF**-Profile für Photovoltaikmodule und **AluTec**-Systeme von insgesamt über 5 MWp Leistung ausgeliefert werden.

Die Kooperation zwischen den Universitäten Genf und Bern und der EPF-Lausanne hat zum Aufbau einer **international anerkannten Fachkompetenz bei photoelektrochemischen Prozessen** geführt. Diese Prozesse nutzen vor allem den kurzwelligen Anteil der unkonzentrierten Sonnenstrahlung für die Spaltung von Wasser in Sauerstoff und **Wasserstoff**, oder für die **Detoxifizierung** von Brauchwasser.

Bei der Entwicklung einer **Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt** ist es gelungen einen **Kompressor für Kohlendioxid** als natürliches Kältemittel zu entwickeln. Der isentrope Wirkungsgrad liegt im gleichen Bereich wie bei konventionellen Kompressoren, was als beachtlicher Erfolg gewertet werden kann. Eine Serienproduktion des Kompressors wird nun angestrebt.

Als Resultat einer nationalen und internationalen Zusammenarbeit wurde im Berichtsjahr eine **erste Pilot-Holzvergasungsanlage** in Betrieb genommen. Sie produziert für eine Sägerei aus 60 kg Holzschnitzeln pro Stunde rund 60 kWh Strom und 120 kWh Wärme.

Mit der **Geothermie-Sondierbohrung** Otterbach 2 in der Region Basel konnte nachgewiesen werden, dass der Standort für **deep heat mining** gut geeignet ist. In 5 km Tiefe werden Formationstemperaturen von mindestens 200 °C erwartet. In Genf wird nun eine zweite Sondierbohrung vorbereitet.

Die Vorbereitungsarbeiten für eine 850 kWp-**Windkraftanlage** ob Andermatt sind abgeschlossen worden. Mit dieser Anlage, die mit modernster Technologie aus Schweizer Unternehmen zusammengesetzt wird, sollen in einer Höhe von über 2'000 m.ü.M. die **Installation unter erschwerten Bedingungen** und der **Einfluss des alpinen Klimas** auf solche Anlagen demonstriert werden.

Ein **Musterbeispiel einer energetischen Nutzung von bestehenden Wasserbauschwellen** wurde mit dem Niederdruck-Wasserkraftwerk in Rüderswil realisiert. Mit einem Umgehungsgewässer für Fische und einer unterirdischen Anordnung aller wesentlichen Anlagenteile wird das Kraftwerk den wesentlichen Umweltauflagen gerecht.

SOURCES D'ENERGIE RENOUVELABLES

Une **norme européenne de tests** *Thermal solar systems and components • Factory made systems* a été établie dans le cadre de l'AIE avec une participation active de la Suisse et a permis à des fabricants de systèmes combinés du monde entier de s'inscrire pour un test au SPF de Rapperswil.

Les systèmes suisses **SOLRIF** et **AluTec** sont parmi les projets P+D ayant eu le plus de succès de ces dernières années dans le domaine **des onduleurs et des systèmes d'intégration et de fixation de modules photovoltaïques**. Les profils SOLRIF et les systèmes AluTec ont été appliqués dans toute l'Europe et ce pour une puissance installée de 5 MWc à fin 2001.

La coopération entre les Universités de Genève et de Berne a conduit à la mise sur pied d'un **centre de compétence internationalement reconnu en matière de processus photo-électro-chimiques**. Ces processus utilisent surtout la partie du rayonnement solaire non concentré de courte longueur d'onde pour la photolyse de l'eau en oxygène et **hydrogène**, ainsi que pour la **détoxication** de l'eau sanitaire.

On a réussi à développer un **compresseur à base de CO₂** mis en œuvre dans des **pompes à chaleur pour le marché de la rénovation**. Le rendement isentropique obtenu avec cet agent frigorigène parfaitement naturel est tout à fait comparable à celui des compresseurs conventionnels, ce qui peut être qualifié de succès notable. Une production en série de tels compresseurs est maintenant envisagée.

Une **première installation pilote de gazéification du bois** a été mise en service durant 2001, résultant d'une collaboration nationale et internationale. Elle produit pour une scierie 60 kWh d'électricité et 120 kWh de chaleur à partir de 60 kg de copeaux de bois par heure.

Dans la région de Bâle, le **forage d'exploration géothermique** de Otterbach 2 a permis de prouver que l'endroit était propice à un **deep heat mining**. À 5 km de profondeur on s'attend à des températures de formation de l'ordre de 200 °C. Un second forage est prévu à Genève.

Les travaux préparatoires pour une **installation éolienne** de 850 kWc au-dessus d'Andermatt ont été achevés. Cette éolienne permettra de faire la démonstration d'une installation pourvue de la technologie des plus modernes, provenant d'une entreprise suisse, à une altitude (plus de 2'000 m) **sous des conditions météorologiques rudes en climat alpin**.

Un **exemple d'une utilisation énergétique de papiers existants dans des aménagements de cours d'eau** a été concrétisé avec la centrale hydraulique à faible chute de Rüderswil. Cette centrale satisfait aux critères environnementaux essentiels grâce à une voie de déviation pour les poissons et à la mise sous terre de tous les éléments essentiels de l'installation.

KERNENERGIE

Im Bereich der **kontrollierten nuklearen Fusion** hat die EPF-Lausanne in Zusammenarbeit mit anderen europäischen Labors einen **Gyrotron** von 140 GHz für den *Stellarator* von Greifswald (D) entwickelt. Diese Anlage erreicht eine Leistung von 1 MW, während einem Puls von 10 s. Mit der Anlage SULTAN am PSI wurden supraleitende Kabel für den geplanten Experimentalreaktor ITER mit 80'000 A getestet.

Das Projekt **Inert Matrix Fuel** (IMF) hat es dem PSI erlaubt, einen **neuen Kernbrennstoff** zu testen: Neben dem spaltbaren U-235 enthält das natürliche wie auch das angereicherte Uran hauptsächlich U-238 als Matrix. Neben der Kernspaltung von U-235 entsteht aus U-238 das hochgiftige Plutonium. Um die Bildung von Plutonium zu vermeiden, wurde ein Brennstoff mit dem **inerten Zirkonoxid als Matrix** hergestellt. Damit wird die Bildung von Plutonium verhindert und ein abgebranntes Element kann ohne Behandlung endgelagert werden. Diese neuen IMF-Elemente könnten auch die klassischen MOX-Elemente (Mischoxyde) ersetzen.

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

In einem **Technologie-Monitoring** werden für ausgewählte Technologien Datenreihen über die Entwicklung der Energie-Gestehungskosten erarbeitet. Daraus soll ein systematisches Technologie-Monitoring mit Benchmarking entstehen, als Grundlage für strategische Entscheide mit möglichst optimalem Mitteleinsatz.

Im Projekt **Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen** (GaBe) hat der Forschungsbereich *nukleare Energie und Sicherheit* des PSI in Zusammenarbeit mit der ETH-Zürich, der ABB, dem MIT, der Universität von Tokyo und chinesischen Forschungsinstitutionen die Möglichkeiten einer nachhaltigen Elektrizitätsproduktion in der Provinz Shandong in China untersucht. Die Modellierung kann auch auf andere Länder Asiens übertragen werden. Die steigende Nachfrage nach Elektrizität und die durch die Produktion in Kohlekraftwerken hervorgerufene Verschmutzung sind verantwortlich für die Versauerung von Böden und für den frühzeitiger Tod von Millionen von Chinesen. Die Kosten für die Verwendung von Filtern oder den Wechsel auf Gas- und Kernkraftwerke sind geringer als die Kosten für die Sanierung von Umweltschäden oder die sozialen Kosten, wenn weiter produziert wird wie bisher.

ENERGIE NUCLEAIRE

Dans le domaine de la **Fusion thermonucléaire contrôlée** l'EPF de Lausanne a développé un **gyrotron** de 140 GHz, pour le *Stellarator* de Greifswald (D), en collaboration avec d'autres laboratoires européens. Cette machine permet d'atteindre une puissance de 1 MW en impulsions allant jusqu'à 10 s. L'installation SULTAN, sise au PSI, a été utilisée pour tester avec un courant de 80'000 A les câbles supraconducteurs de la future machine ITER.

Le projet **Inert Matrix Fuel** (IMF) a permis au PSI de mettre au point un **combustible nucléaire d'un nouveau genre**: à côté de l'U-235 fissile, l'isotope U-238 qui est le composant principal de l'uranium naturel, et aussi de l'uranium enrichi • sous la forme d'une matrice d'oxyde d'uranium constituant l'élément de combustible • est remplacé par de l'oxyde de zirconium, formant une **matrice inerte** sous irradiation. Cela empêche la formation indésirable de plutonium. Ainsi les éléments irradiés pourront être stockés directement, sans le retraitement qui serait nécessaire pour récupérer le plutonium. Ces éléments IMF pourraient alors aussi remplacer les éléments MOX (oxydes mixtes) classiques.

FONDEMENTS DE L'ECONOMIE ENERGETIQUE

Dans un **technology-monitoring** ont été préparées des séries de données pour des technologies choisies concernant le développement des coûts de production d'énergie. Il devra en sortir un **technology-monitoring** systématique avec *benchmarking*, lequel devrait servir de base pour des décisions stratégiques en vue de l'engagement optimal de moyens financiers.

Dans le projet **Examen global des systèmes énergétiques** (GaBe), la division *Énergie et sécurité nucléaire* du PSI • en collaboration avec l'EPFZ, ABB, le MIT (USA), l'Université de Tokyo, ainsi que des institution de recherche de Chine • a examiné les options de production durable d'électricité dans le cas de la Province de Shandong. Cette modélisation peut s'étendre à d'autres parties de l'Asie. La croissance passant par une demande accrue d'électricité, sa production polluante par les centrales au charbon est à ce jour responsable de l'acidification de l'air et du sol, et de la mort prématurée de millions de chinois. Avec une utilisation de filtres ou le recours au gaz et au nucléaire, les coûts nouveaux engendrés sont inférieurs aux coûts environnementaux et sociaux prévus si cette production d'électricité continue de rester non durable.

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG IN GEBÄUDEN

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2001

Mark Zimmermann

mark.zimmermann@empa.ch



Umbau mit Passivhaus-Standard, Zürich Magnusstrasse (Architekt: K. Viridén, Zürich)

Südostansicht des mit denkmalpflegerischen Auflagen umgebauten Objektes. Sanierungen stellen weit höhere Anforderungen an Planung und Ausführung als Neubauten. Bis 2003 wird die Erfolgskontrolle dauern, welche aufzeigen soll, ob der Passivhausstandard erreicht wurde.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Programm **Rationelle Energienutzung in Gebäuden** fördert den effizienten und umweltschonenden Energieeinsatz im Gebäudebereich. Die eidg. Energieforschungskommission **CORE** räumt der Forschung, Entwicklung und Demonstration im Gebäudebereich einen hohen Stellenwert ein. Einerseits spielt die Bauwirtschaft eine bedeutende energie- und umweltpolitische Rolle, andererseits bestehen auf dem Gebiet noch grosse Effizienzpotentiale, die sich ausschöpfen lassen:

- Pro Einwohner gibt es in der Schweiz ein Gebäudeinventar von 180 t. Jährlich kommen über 4 t dazu.
- 70 % aller Abfälle stammen aus dem Baubereich, aber weniger als 1 % des verbauten Materials wird recycelt.
- Ca. 50 % des Energieverbrauchs werden zum Betreiben der Wohn-, Dienstleistungs- und Gewerbebauten eingesetzt und etwa 10 % werden für die Herstellung von Baustoffen und Bauprodukten benötigt.

Das Programm erforscht Grundlagen zur **rationelle Energienutzung in Gebäuden** und fördert die Entwicklung und Demonstration verbesserter Technologien, um die vorhandenen Sparpotentiale auszunutzen. Vereinzelt Demonstrationsbauten beweisen, dass beispielsweise beim Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser gegenüber konventionellen Gebäuden Einsparpotentiale von 50 – 90% vorhanden sind. Der in der Schweiz gut eingeführte **Minergie-Standard** gilt grundsätzlich als Mindestanforderung für Demonstrationsbauten.

Das Programm befasst sich mit **Gebäudesystemen**, mit der **Gebäudehülle**, mit den **haustechnischen Installationen** und mit der **Nutzung der Sonnenenergie**. Im Vordergrund stehen die Optimierung ganzer Gebäudesysteme und die ganzheitliche Berücksichtigung der Umweltwirkungen. Währenddem früher die Einsparung oder Substitution von fossilen Energieträgern Vorrang hatte, steht heute die Reduktion des Primärenergieverbrauchs und die Minimierung der Umweltbelastung im Vordergrund.

Anfangs 2000 wurde das Programm für die nächsten 4 Jahre festgelegt und öffentlich ausgeschrieben. Von zentraler Bedeutung sind dabei:

- **Hochisolationstechnik:** Entwicklung und Demonstration neuer hochisolierender Dämmstoffe und Systeme, 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 Gewerbebau.
- **Umwelttechnik:** Bereitstellen von Grundlagen, sowie Erarbeitung und Anwendung von praxisnahen Methoden zur gesamtheitlichen Beurteilung von Bauten, Systemen und Komponenten.

Auf diesen drei 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 beitragen zu können.

Durch die im Jahr 2000 durchgeführte Programmausschreibung konnte im Berichtsjahr eine grössere Anzahl wichtiger Projekte gestartet werden. Diese konzentrierten sich auf die Bereiche:

- **Hochisolationstechnik**, inkl. Lösungen für Wärmebrücken, besonders ausgerichtet auf Sanierungen
- **Sonnenenergienutzung**, verbunden mit den Problemen des **Sonnenschutzes**, der **Kühlung** und der **Tageslichtnutzung**
- **Passivhäuser** und optimierte **Systeme** zur Deckung **des minimierten Energiebedarfs**
- **Umweltaspekte** des Bauwesens und der Energienutzung sowie umweltbezogene **Bestellerkompetenz**

Etwas weniger im Vordergrund standen die Bereiche, die zwar auch ausgeschrieben waren, zu denen es jedoch verhältnismässig wenig Projektanträge gab:

- neue **Diagnose- und Abnahmeverfahren** zur Verbesserung der Bauqualität
- Systeme zur **Nutzung von Temperaturkaskaden, Abwärme** sowie zur **Energiespeicherung** und **Warmwasserversorgung**

- **Bedarfsgeregelte Systeme** zum Einbezug des Benutzer- und Betreiberhaltens

Im August 2001 wurde eine Beurteilung des Programms durch ein internationales Expertenteam vorgenommen. Die Ausrichtung des Programms wurde als richtig erachtet und das vor-

handene Netzwerk zur Verwertung der Forschungsergebnisse in der Praxis als wichtig eingestuft. Entsprechend wurde das Vierjahresprogramm 2000-2003 [49] auch von der schweiz. Energieforschungskommission *CORE* gutgeheissen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

UMWELTECHNIK

Das Programm befasst sich vor allem mit den Umweltwirkungen der Energienutzung, mit Bewertungsmethoden, mit der Entwicklung von Instrumenten zur Beurteilung der Umweltauswirkungen sowie mit der Verminderung von grauer Energie.

Die Arbeiten am Ökoinventar *Ecoinvent 2000* kommen gut voran. Diverse Institutionen des *ETH*-Bereichs unter der Leitung der *EMPA* haben sich zu einem **Zentrum für Ökoinventare** zusammengeschlossen und wollen bis Ende 2002 ein überarbeitetes, harmonisiertes Ökoinventar für Energiesysteme, Investitions- und Konsumgüter, Transporte und Entsorgungsprozesse auf dem Internet zur Verfügung stellen. Für interessierte Anwender wurde eine Homepage eingerichtet (www.ecoinvent.ch)

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* und das *Bundesamt für Bauten und Logistik* unterstützt.

Mit dem Projekt *Ecoinvent 2000* werden Grundlagen bereitgestellt, mit welchen anwendungsorientierte Fragestellungen erst untersucht werden können. Im Projekt **ökologische Optimierung von Passivhäusern** [3] werden auf der Basis solcher Daten, die Umweltwirkungen von extrem energieeffizienten Gebäuden analysiert und Empfehlungen für geeignete Konzepte ausgearbeitet. Im laufenden Jahr wurde mit der Auswertung ausgewählter Bauten begonnen. Konkrete Ergebnisse sind erst 2003 zu erwarten.

Bereits liegt jedoch eine Empfehlung für **Architekturwettbewerbe** vor. Mit dem Projekt *Snarc* [4] wurden Kriterien und eine Richtlinie zur umweltbezogenen Beurteilung von Architekturwettbewerben erarbeitet. Die Arbeiten wurden durch die *Zürcher Hochschule Winterthur* zusammen mit rund 20 Projektpartnern (Hoch-

bauämter, Bundesämter, Verbände und Private) durchgeführt. Die Richtlinie gibt wertvolle Kriterien zur ökologischen Beurteilung von Bauprojekten. Sie kann heruntergeladen werden unter: <http://home.zhwin.ch/~pre/z04forschung/snarc/zsnarcframes.html>

Zur Reduktion der Grauen Energie sollen zukünftig vermehrt auch nachwachsende Rohstoffe im Bauwesen eingesetzt werden. Mit der Dämmstoffindustrie wurden Dämmstoffe aus **Hanf- und Grasfasern** entwickelt [5]. Beide Rohstoffe sind aus landwirtschaftlicher Sicht interessant und in genügender Menge verfügbar. Erste Isolationsarbeiten wurden mit den neuen Dämmstoffen vorgenommen. 2002 sollen weitere Demonstrationsanwendungen folgen.

PASSIVE SONNENENERGIENUTZUNG / GEBÄUDESYSTEME

Besonderes Gewicht hat in diesem Bereich die sorgfältige Abstimmung von Sonnenenergiegewinnen, Wärmebedarf, Beschattung und Kühlung im Sommer.

Das *IEA*-Projekt **Solar Sustainable Housing** [6] untersucht, optimiert und demonstriert im internationalen Rahmen Gebäude, welche rund 10 mal weniger Heizenergie benötigen als konventionelle Bauten. Hochisolationstechniken, effiziente Gebäudetechnik, erneuerbare Energien und Nachhaltigkeitsaspekte werden optimal aufeinander abgestimmt. Das Projekt will aber nicht nur technische Fragestellungen lösen, sondern auch die Nachfrage im Baumarkt für solche Gebäude fördern. Dazu wurde eigens eine **Marktanalyse** gestartet [7], die untersuchen soll, welches die Vorurteile von Bauherrschaften gegenüber Niedrigenergiehäusern resp. *Passivhäusern* sind.

Nebst dem *Minergiestandard* findet wohl der aus Deutschland stammende *Passivhausstandard* (www.passiv.de) am meisten Beachtung. Er ist in Deutschland und Österreich verbreitet und geht

bezüglich Energieeffizienz noch ein Stück weiter als *Minergie Passivhäuser* 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 untersucht, inwieweit sich die beiden Standards wirklich unterscheiden und ein Vorschlag ausgearbeitet, wie mit einer *SIA 380/1* kompatiblen Berechnung der Nachweis sowohl für *Minergie*- als auch für den deutschen Passivhausstandard erbracht werden könnte. Das Ziel ist, gegenüber *Minergie* einen *Minergie-Plus-Standard* zu definieren, welcher automatisch auch die Anforderungen des Passivhausstandards erfüllen würde. Über die Einführung dieses Zusatzpakets wird im Mai 2002 entschieden.

Eine Zusammenstellung über **die Erfahrungen mit ca. 60 Solargebäuden** wird zurzeit aufbereitet [9]. Sie gibt in übersichtlicher Form Auskunft über die angewendeten Strategien und Erfahrungen. Die bereits dokumentierten Gebäude und Strategien sind zu finden unter:

www.empa.ch/DEUTSCH/zentren/zen/ren/Solarhaeuser_Doku

Eines der in der Zusammenstellung gezeigten Gebäude ist ein **Mehrfamilien-Passivhaus** mit solarem **Luftkollektorsystem** in Winterthur. Mit einem jährlichen Heizwärmebedarf von 65 MJ/(m²·a) erreicht es zwar nicht ganz Passivhauswerte, setzt aber ausschliesslich erneuerbare Energie (Pelletofen) zu dessen Deckung ein. Das Gebäude wurde detailliert untersucht. Der Schlussbericht liegt nun vor [10].

Luftkollektorsysteme stehen auch im Zentrum einer **Planungsrichtlinie für solare Luftheizsysteme** [11], welche 2003 erscheinen soll. Sie wird die Erkenntnisse aus einem früheren *IEA*-Projekt und die Erfahrungen mit solchen Anlagen in der Schweiz zusammenfassen.

Eine Art **Luftkollektoren, jedoch kombiniert mit Photovoltaik** untersucht die *ETH Zürich* [12]. Da Photozellen nur etwa 15 % der Einstrahlung in elektrische Energie und 85 % in Wärme umwandeln, liegt es nahe, auch die anfallende Wärme zu nutzen. Durch Messungen an einem Aussenprüfstand an der *HTA Luzern* soll im Projekt das vorhandene Potenzial (Luftmengen, Temperatur, zeitliche Verteilung) ermittelt und die Verwendungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

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

- Im Rahmen des *IEA Solar Task 23* wird eine Methode **zur Optimierung der Sonnenenergienutzung in grösseren Gebäuden** erarbeitet [13]. Sie soll dem Planer vor allem bei der Systemevaluation und im Entscheidungsablauf unterstützen.
- Mehr von der praktischen Seite her untersucht die *ETH-Lausanne* das **Solarpotential von Städten** [14a]. Anhand von drei städtischen Quartieren will die Studie exemplarisch aufzeigen, welches Potential mit Sonnenkollektoranlagen, Photovoltaikanlagen und mit Tageslichtnutzung effektiv ausgeschöpft werden könnte.
- Die *ETH Lausanne* beteiligt sich auch an einem *IEA*-Projekt **zur Optimierung der Tageslichtnutzung in Gebäuden** [14b]. Das Ziel ist die Erarbeitung von technischen Lösungsvorschlägen für die effiziente Kunst- und Tageslichtnutzung.

GEBÄUDEHÜLLE

Mit der Einführung der neuen *SIA-Norm 380/1* [50] erhält die dichte und gut gedämmte Gebäudehülle mehr Gewicht. Die Gebäudehülle ist im Wesentlichen massgebend für den für Bauvorhaben verlangten Wärmebedarfsnachweis. Dazu müssen neuerdings auch die Wärmebrücken konsequent einbezogen werden. Mit der laufenden thermischen Verbesserung der Gebäudehülle hat sich der Einfluss der Wärmebrücken verstärkt. Zur Einführung der Norm wird deshalb nicht nur der bisherige Bauteilkatalog überarbeitet, sondern auch ein umfangreicher, praxistgerechter **Wärmebrückenkatalog** [15] bereitgestellt. Beide Kataloge sind ab Sommer 2002 verfügbar.

Eine Lösung zur Verringerung der Wärmebrückenwirkung bei **Unterkonstruktionen hinterlüfteter Fassaden** wurde mit der Durchführung eines Wettbewerbs [8b] gesucht. Im laufenden Jahr konnten Demonstrationsprojekte für die drei prämierten Lösungen geplant werden, die im Jahr 2002 zur Ausführung gelangen sollen.

Einen ganz wichtigen Schwerpunkt des Forschungs- und Demonstrationsprogramms stellen **Hocheffiziente Wärmedämmsysteme** dar, welche die optimale Dämmdicke (*U-Wert* < 0.2 W/(m²·K)) von 30 bis 40 cm auf weniger als 5 cm reduzieren sollen (s. Fig. 1). Diese Effizienzsteigerung ist vor allem bei Gebäudesanierungen und für die Isolation von Haushaltapparaten und -

geräten wichtig, wo der Platz für dickere Dämmungen fehlt. Die Nachfrage nach solchen Hochleistungsdämmsystemen ist bereits sehr gross. Auf besonderes Interesse stossen sie, wenn Planungsfehler eine korrekte Dämmung mit herkömmlichen Dämmstoffen verunmöglichen.



Figur 1: Dämmstoffpaneele mit Vakuum (im Bild rechts) dämmen bis zu 10 mal besser als herkömmliche Dämmstoffe (links). Sie haben dort ein grosses Anwendungspotential, wo der Platz für dicke Dämmschichten fehlt.

Die Schweiz führt auf dem Gebiet der **Hochisolationstechnik** ein internationales Projekt der *IEA* an [16]. An einer internationalen Konferenz über **High Performance Thermal Insulation Systems** [51] wurde anfangs 2001 der Stand der Technik an der *EMPA* vorgestellt und das *IEA*-Projekt gestartet. Die Schweiz beteiligt sich mit verschiedenen Projekten an der Erarbeitung von Grundlagen und von Prüfmethoden zur **Qualitätssicherung** [17a] sowie an der Entwicklung neuer **Applikationen** [8c] [18] [19]. Erste Anwendungen konnten im Rahmen von Pilot- und Demonstrationsprojekten bereits erfolgreich eingesetzt werden [35b].

Im **Fassadenbereich** wurden in den vergangenen Jahren grosse Fortschritte erreicht. Auf dem Markt sind Verglasungen mit *U*-Werten um 0.8 bis 0.3 $W/(m^2 \cdot K)$ verfügbar. Der Trend zu extrem stark verglasten Bauten hat sich infolge des verbesserten Wärmeschutzes von Verglasungen bei Architekten und Bauherren massiv verstärkt. Bauten mit schlechtem Komfort und hohen

Kühllasten sind oft die Folge. Um diesem Problem zu begegnen, wurde eine **Planungsrichtlinie für stark verglaste Bauten** [20] erarbeitet. Sie wird in der ersten Hälfte 2002 erscheinen.

Wichtig dazu ist die genaue Kenntnis der **Wärmelasten transparenter Bauteile und Sonnenschutzsysteme** [17b], welche am Solarprüfstand der *EMPA* für typische Systeme gemessen werden konnten. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es selbst bei gutem Sonnenschutz schwierig ist, die Solargewinne auf unter 15 % der Einstrahlung zu reduzieren und gleichzeitig den Anforderungen der Tageslichtnutzung zu genügen. Deshalb werden nun die Messungen im Rahmen eines *IEA*-Projekts auf weitere Systeme ausgedehnt und so die Simulationsmöglichkeiten für Sonnenschutzsysteme verbessert [17c].

Fast ebenso wichtig wie der gute Wärmeschutz ist die Dichtheit der Gebäudehülle. Die Lüftungswärmeverluste lassen sich nur wirksam minimieren, wenn unkontrollierter Luftaustausch durch die Gebäudehülle vermieden werden kann.

Das Projekt *ATEMAC* [21] befasste sich mit der Tracergastechnik zur **Diagnose des mittleren Luftwechsels**. Die Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass dazu keine geeigneten Testgase verfügbar sind, da alle einfach einsetzbaren Gase durch die Bauteile absorbiert und dadurch die Messergebnisse verfälscht werden. Stattdessen lässt sich über die Veränderung der Kohlendioxidkonzentration in der Raumluft auf den Luftwechsel schliessen. Die Ergebnisse sind vielversprechend und die Technik sollte in einem Folgeprojekt weiterverfolgt werden.

Indirekt kann auch über Luftdichtheitsmessungen der natürliche Luftaustausch beurteilt werden. Allerdings sind die Anforderungen – zum Beispiel an *Passivhäuser* – so hoch, dass die Messung sehr schwierig und oft nicht genügend genau ist. Mit dem Projekt **Messung und Beurteilung der Luftdichtheit von Niedrigenergiehäusern** [22] soll die Messtechnik so verbessert und vereinfacht werden, dass sie sich auch zur Abnahme von Niedrigenergiehäusern eignet. Möglicherweise können dazu die hauseigenen Lüftungsanlagen verwendet werden.

HAUSTECHNIK

Planungswerkzeuge haben in der Haustechnik eine grosse Bedeutung. Diverse Software-Entwicklungen werden zurzeit im Umfeld der Programm-Familie *IDEA* der *HTA Luzern* realisiert. Diese Programm-Familie stellt eine wichtige Plattform für integrale Haustechnikwendungen dar. Wichtige Entwicklungsarbeiten sind:

- **Harmonisierung der Nutzungsprofile SIA 382/2 und SWKI 95-3** [23a]: Genaue Angaben über die internen Wärmelasten verschiedener Nutzungen sind für Gebäudesimulationen wichtig. Dank der erfolgten Harmonisierung stehen nun in der Schweiz für alle Software-Programme detaillierte und aufeinander abgestimmte Lastannahmen zur Verfügung.
- Das **Kältetool SIA 380/4** zur Bestimmung des Elektrizitätsbedarfs durch Kühlung [23b] soll im Jahr 2002 zusammen mit den Modulen für Beleuchtung und Lüftung die Berechnung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden ermöglichen.
- Das Programm *SIA 382/3* für den **Kühl-lastnachweis** wurde mit der Fachhochschule in Yverdon ins Französische übersetzt [24] und steht nun auch in der Westschweiz für Planung und Schulung zur Verfügung (www.eivd.ch/igt/index_n.html?freeware).
- Für die **Berechnung des Jahresenergiebedarfs von Lüftungsanlagen** [25] steht ein neues Planungsinstrument zur Verfügung. Es ermöglicht den Planern, mit einfachen Angaben den jährlichen Energieverbrauch von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung zu bestimmen.
- **Praxisnahe Validierung von Simulationsprogrammen** im Rahmen des *IEA Solar Task 22* [26].

Guten Erfolg verspricht man sich von neuen Regelalgorithmen, die nicht mehr auf physikalischen Zusammenhängen basieren, sondern auf **neuronalen Netzwerken und Fuzzy-Logik** aufbauen. Im Vordergrund stehen nicht nur Energieeinsparungen, sondern vor allem eine einfachere Installation und Inbetriebnahme, da der Regler in der Lage ist, sich selbst zu optimieren. Allerdings gelang es bis jetzt nicht, den entwickelten Prototypen in ein industrielles Projekt zu überführen. Zurzeit laufen jedoch noch weitere Feldtests am *CSEM* in Neuenburg, wel-

che die Praxistauglichkeit dieses Konzepts untermauern sollen [27].

Auch auf Energieeffizienz von haustechnischen Anlagen konzentriert sich das *IEA-Projekt **Commissioning of Building HVAC Systems for Improved Energy Systems*** [28]. Durch kontrollierte Inbetriebnahme und regelmässige Überwachung im Betrieb soll der Energieverbrauch haustechnischer Anlagen gesenkt werden. Schweizer Vertreter haben an den Vorbereitungen dieses neuen *IEA-Projekts* teilgenommen und sehen gute Chancen, die Projektergebnisse in der Schweiz umzusetzen.

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. Vielfach 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* wurde deshalb ein **Prüfreglement für Kombigeräte** [29] erarbeitet.
- Der häufige Einsatz von **Warmluftheizungen in Passivhäusern** ist nicht ganz unproblematisch. Um zu erreichen, dass die neuen Möglichkeiten für Warmluftheizungen optimal genutzt werden, wird zurzeit eine Planungsrichtlinie erarbeitet [30a], welche auch die Problematik von Holzöfen in Niedrigenergiehäusern behandeln soll.

Nicht ganz Passivhaus-tauglich aber immerhin interessant für **energietechnische Sanierungen** sind 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 Wärme der Abluft kann zum Beispiel mit einer Wärmepumpe für die Warmwasseraufbereitung genutzt werden. Die laufenden Untersuchungen zu diesem System [30b] zeigen, dass eine gezielte Luftführung eine dichte Gebäudehülle und ein gut ausbalanciertes Lüftungssystem erfordert. Andernfalls ist die Wirkung ungenügend.

Nationale Zusammenarbeit

Von den laufenden 37 vom BFE unterstützten Forschungsprojekten wurden 15 Projekte mit **Fachhochschulen**, 16 Projekte mit **ETH-Instituten** und 10 Projekte mit der **Industrie** durchgeführt. An 21 Projekten waren planende **Ingenieurbüros** beteiligt und in 7 Projekten wurde mit **Branchenverbänden** zusammengearbeitet. Dadurch hat sich die Vernetzung der Projektpartner gegenüber dem Vorjahr weiter verstärkt.

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. Die Zusammenarbeit der Fachhochschulen mit der KTI hat noch nicht den gewünschten Umfang angenommen. Neue Impulse werden diesbezüglich mit der Gründung des **BRENET-Netzwerks** (*Building and Renewable Energies Network of Technology*) erwartet.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit ermöglicht den wissenschaftlichen Erfahrungsaustausch mit wichtigen Industrienationen (vorwiegend EU- und OECD-Mitgliedstaaten) und fördert die internationale 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 2001 an sieben Projekten engagiert.

- *Building energy analysis tools, SHC Task 22*, Abschluss 2002 [26]
- *Optimisation of solar use in large non residential buildings, SHC Task 23*, Abschluss 2002 [13]
- *Performance assessment of solar building envelope components, SHC Task 27*, Abschluss 2003 [17c]
- *Solar sustainable buildings, SHC Task 28*, 2000 gestartet, Abschluss 2005 [6]
- *Daylighting buildings in the 21st century, SHC Task 31*, gestartet 2001, Abschluss 2005 [14b]
- *High performance thermal insulation systems, BCS Annex 39*, 2001 gestartet, Abschluss 2004 [16]
- *Commissioning of building HVAC systems for limproved energy performance, BCS Annex 31*, 2001 gestartet, Abschluss 2004 [28]

6 Projekte des 4. EU-Rahmenprogramms sind in Bearbeitung:

- *PRECIS: Assessing the potential for renewable energy in cities* (Hemmer, Ecole d'Ingénieurs de Fribourg)
- *ECOCOOL: Ecological cooling for buildings by combining a closed wet cooling tower with chilled ceilings* (Borth, Sulzer Infra)
- *DESICAIR COOLING: A novel desiccant cooling system using needle impeller rotors* (Borth, Sulzer Infra)
- *CEPHEUS: Cost efficient passive houses as European Standards* (Renggli, Renggli AG)
- *TOBUS: A decision-making tool for selecting office building upgrading solutions* (Roulet, EPF Lausanne)
- *Solar building façades* (Frei, SPF Rapperswil)

Im Rahmen des **5. EU-Rahmenprogramms** hat sich die Zahl der unterstützten Projekte von 2 auf 9 erhöht.

- *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)

- *EVAPCOOL: Passive down draught cooling – development of key components (Borth, Sulzer Infra)*
- *SOLAR LOUVRE: Solar louvre building integrated collector (Borth, Sulzer Infra)*
- *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)*
- *HOPE; Health optimisation protocol for energy-efficient buildings: pre-normative and socio-economic research to create healthy and energy-efficient buildings (Foradini, E4tech Sàrl)*

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Dank der Ausschreibung im Forschungsprogramm konnten auch gezielt Pilot- und Demonstrationsprojekte initiiert und gestartet werden. Die Ankoppelung der P+D-Projekte an die Forschungsschwerpunkte hat sich bewährt.

2001 wurden relativ wenige Projekte abgeschlossen. Zum Jahresbeginn konnte das Messprojekt **Doppelfamilienhaus am Birkenweg** in Hochdorf [31] vorgestellt werden. Wichtigste Erkenntnisse sind, dass bei der Einbindung von Holzöfen in Luftheizungen die Zusammenarbeit zwischen Hafner und Lüftungsinstallateur von Anfang an sehr gut koordiniert sein muss, um die Dichtheit der Systeme zu gewährleisten. Zudem müssen die Kanäle so kurz wie möglich und gut wärmegeklämt sein, damit die Wärme nicht passiv an die Gebäudekonstruktion abgegeben wird. Das Projekt **Luftheizung mit Holzofen bei einer EFH-Sanierung** [32], abgeschlossen Ende 2001, bestätigte diese Erkenntnisse weitgehend und legte die problematischen Punkte bei der Sanierung von Gebäuden offen. In der gleichen Reihe von Projekten mit verschiedenen Kombinationen von Lüftung und Holzofen konnte das dritte Projekt **Grasswil** [33] wegen Nachbesserungen noch nicht fertig ausgemessen werden. Die Resultate sind auf Frühjahr 2002 versprochen. Bis dann sollen auch Empfehlungen aus den drei Projekten zusammengestellt sein.

Bei den laufenden Projekten **Energetische Sanierung einer grossen Wohnsiedlung** (Zürich) [34], **Ökosiedlung Melchrüti** (Wallisellen) [35a], **Niedrigenergiehaus** (Erlenbach) [36] und **Synergiepark für erneuerbare Energien** [37] (Gams) sind die Messkampagnen voll im Gang. Der Passivhausstandard wird bei den **Projekten 1. Schweizerisches Wohn- und Gewerbebau im Passivhausstandard** (Rapperswil) [38], **TWD-**

Fassadenelement mit integriertem Latentspeicher und Sonnenschutz (Ebnat-Kappel) [39], **Wohnen in Sunny Woods** (Zürich) [35b] und **Passiv-Acht-Familienhaus** (Stans) [40] näher untersucht. Dabei ist erstaunlich, wie rasch der *Passivhausstandard* im Mehrfamilienhausbau Fuss fassen konnte.

Sieben neue Projekte wurden 2001 gestartet. Einen wichtigen Schwerpunkt bilden die Gebäude, welche den *Passivhausstandard* nach *Dr. W. Feist* erfüllen. In Zürich konnte das erste Projekt einer *Passivhaus*-Sanierung in Angriff genommen werden. Das **Passivhaus im Umbau** [41] an der Magnusstrasse erfüllt zwar nicht ganz alle Rahmenbedingungen (U-Werte, Luftdichtheit), doch soll der Energieverbrauch den Standard erreichen. Messungen von verschiedenen Teilprojekten dauern bis 2003. Bereits im Herbst 2002 wird ein erster Zwischenbericht vorliegen, der aufzeigen soll, ob die gesteckten Ziele erreicht werden konnten.

In Unterägeri wird das **Passiv-Mehrfamilienhaus Stämpfli** [42] durch das BFE unterstützt. Trotz intensiven Bemühungen konnte für die Wärmeerzeugung leider noch keine Brennstoffzelle eingesetzt werden. Im Frühjahr 2002 wird das Gebäude bezugsbereit sein. Dann wird eine modulierende WKK mit Flüssiggas das Gebäude mit Wärme und Strom versorgen. Eine spätere Umstellung auf eine Brennstoffzelle ist vorgesehen.

In Barga (Schaffhausen) wird das Projekt **Zweifamilienhaus "Im Tal" mit Duplex WP für Heizung und Warmwasser** [43] gefördert. Im ersten *Passivhaus* im Kanton Schaffhausen wurde eine Wärmepumpe gewählt, die im Waschtrocknungsraum die Luft entfeuchtet und Wärme über die erdberührten Bauteile aus dem Erdreich bezieht. Zusätzlich steht noch die Wär-

me der Abluft der Komfortlüftung zur Verfügung.

Ein weiteres **Zweifamilienhaus**, das ebenfalls nahe an den *Passivhausstandard* herankommt wird **im Tessin** ausgemessen [44]. 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** [45] 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.

Die vollflächige **Integration eines solaren Luftsystems und einer PV-Anlage** [46a] 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.

Beim Projekt **Integration einer konvektiven Fassade in ein Heimatschutzobjekt** [46b] in Herisau kann sehr gut gezeigt werden, dass der *Passivhausstandard* und die Solarnutzung durchaus mit einer Bauweise verträglich ist, wie sie die Denkmalpflege vorschreibt. Die Demonstration einer grossflächigen Sonnenenergienutzung bei einem Objekt, welches strengen architektonischen Auflagen genügen muss, ist für den traditionellen Baustil in Appenzell neu.

Mit dem Projekt **Phönix light – Heizen und Kühlen mit PCM** (Phase Change Material) [47] sollen die rechnerischen Grundlagen geschaffen werden, um die Einbindung von PCM-Material in Lüftungsanlagen zu dimensionieren. Die Grundidee wurde bereits an der *Swissbau 2001* vorgestellt und weitere Vorarbeiten wurden unternommen. Bei Bauten ohne oder mit wenig thermisch wirksamer Speichermasse kann die Anwendung von PCM die Haustechnik unterstützen.

Beilligt wurde das Projekt **Deckenstrahlung in Eishallen und überdeckten Ausseneisfeldern** [48]. Der IR-Strahlungsaustausch zwischen einer Eishallendecke und dem darunter liegenden Eisfeld lässt sich beträchtlich reduzieren, wenn die Deckenunterseite aus strahlungsreflektierendem Material (z. B. blankes Metall) besteht. Dadurch lassen sich Energieeinsparungen (Wärme und Kälte) von bis gegen 30 % realisieren. Mit dem vorliegenden Projekt sollen die rechnerisch ermittelten Einsparungen am realen Objekt messtechnisch untersucht werden.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Wichtige Ereignisse waren für das Programm die Evaluation durch internationale Experten und die Beurteilung durch die eidg. Energieforschungskommission *CORE*. Die Zielsetzungen des *CORE* Konzepts der Energieforschung des Bundes 2000-2003 werden gemäss Evaluation konsequent umgesetzt. Die Konzentration auf wenige, aber progressive Programmschwerpunkte wurde als richtig erachtet. Im wesentlichen sind es:

- Massnahmen zur Minimierung des Wärmebedarfs (hochdämmende, dichte Gebäudehüllen, Bedarfslüftung)
- Integrale Konzepte zur Sonnenenergienutzung (Passive und aktive Gewinne, Beschattung und Kühlung, Tages- und Kunstlicht)

- Haustechniksysteme für minimierten Bedarf (weg von konventioneller Zentralheizung)
- Berücksichtigung der Umweltaspekte (primär im Betrieb, sekundär bei der Erstellung von Gebäuden)

Als Minimumstandard für Forschung und Demonstration gilt *Minergie*, als Zielwert für Neubau und Sanierung der *Passivhausstandard*.

Mit dem Projekt *CEPHEUS*, mit der Leitung des *IEA*-Projekts **Solar Sustainable Buildings** [6] und **High Performance Thermal Insulation** [16] hat die Schweiz den Anschluss an die Entwicklung des *Passivhausstandards* gefunden. Bereits 2001 wurde eine ganze Reihe neuer *Passivbauten* realisiert, vor allem Mehrfamilienhäuser

und sogar eine Passiv-Gebäudesanierung. Im Januar 2002 wird die *europäische Passivhaustagung* in der Schweiz (Basel, *Swissbau*) stattfinden.

Die Verbreitung der *Passivhaustechnologie* ist somit im Neubau bereits weit fortgeschritten. Nach wie vor hinkt jedoch die Gebäudesanierung dieser Entwicklung weit hinten nach. Es müssen zusätzliche Anstrengungen unternommen werden, um Energieeffizienz auch bei bestehenden Bauten zu erreichen.

Die erneute Ausschreibung des Programms im Jahr 2002 wird diesem Bedürfnis Rechnung tragen. Zudem soll auch die qualitative Verbesserung ganzer Quartiere verstärkt angegangen werden. Eine nachhaltige Entwicklung kann nicht auf das einzelne Gebäude beschränkt werden, sondern muss den gesamten Lebensraum unserer Gesellschaft umfassen. Der Einbezug ganzer städtischer Quartiere ist ein erster Schritt dazu.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden
(ZB) Zwischenbericht vorhanden

Alle Berichte können unter folgender Internet-Adresse heruntergeladen werden: www.empa.ch/ren. Wichtige Berichte sind auch in gedruckter Form (gegen Unkostenentschädigung) bei der Programmleitung erhältlich. Bestellformular: www.empa.ch/DEUTSCH/zentren/zen/ren/Bestell

- [1] R. Dones (roberto.dones@psi.ch), PSI, *Villigen: Ecoinvent 2000 – Ökoinventare für Energiesysteme* (JB+ZB)
- [2] R. Frischknecht (frischknecht@esu-services.ch), ESU, *Uster: Ökoinventare für Solar- und Heizsysteme*
- [3] A. Lalive (alalive@bhz.ch), Basler&Hofmann, *Zürich: Ökologische Optimierung von Solargebäuden über deren Lebenszyklus* (Beitrag IEA/SHC Task 28)
- [4] W. Ramseier (ra@adp-architektur.ch), ZHW, *Winterthur: Standards zur Beurteilung von Nachhaltigkeitsaspekten im Architekturwettbewerb (Snarc)*
- [5] J.-L. Hersener (hersener@pop.agri.ch), Ingenieurbüro, *Wiesendangen: Einblasdämmstoff aus Faserhanf und Altpapier* (JB)
- [6] R. Hastings (robert.hastings@freesurf.ch), AEU, *Wallisellen: IEA/SHC Task 28: Solar Sustainable Buildings (Nachhaltige Solar-Wohnbauten)* (JB)
- [7] T. Andris (tom.andris@renggli-haus.ch), Renggli AG, *Schötz: Marktanalyse Passivhaus Schweiz* (Beitrag IEA/SHC Task 28)
- [8] A. Binz (a.binz@fhbb.ch), FHBB, *Muttenz: a) Minergie und Passivhaus: Zwei Gebäudestandards im Vergleich* (JB) • *b) Thermisch optimierte Unterkonstruktionen für hinterlüftete Fassaden* (JB) • *c) Vakuum-Dämmung im Baubereich – Systeme und Applikationen* (Beitrag IEA BCS Annex 39) (JB)
- [9] Y. Kaiser (sonnenarchitektur@energienetz.ch), Kaiser & Partner, *Winterthur: Solargebäude – Strategien und Erfahrungen des energieoptimierten Bauens* (JB)
- [10] A. Gütermann (amena.ag@energienetz.ch), amena ag, *Winterthur: Messprojekt "Mehrfamilien-Passivhaus mit solarem Luftsystem"* (JB)
- [11] Ch. Filleux (chfilleux@BHZ.ch), Basler + Hofmann, *Zürich: Planungsrichtlinie für solare Luftheizsysteme* (JB)
- [12] S. Kropf (kropf@hbt.arch.ethz.ch), ETH, *Zürich: Integration von kombinierten PV- und thermischen Kollektoren in Gebäudesystemen* (JB)
- [13] P. Jaboyedoff (sorane@worldcom.ch), Sorane, *Lausanne: IEA/SHC Task 23: Optimisation of solar energy use in large buildings* (JB)

- [14] 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)*
- [15] Th. Kersten (thorsten.kersten@infomind.ch), infomind gmbh, *Zürich: Wärmebrücken-Atlas WBB 2000 (JB)*
- [16] M. Erb (markus.erb@eicher-pauli.ch), Eicher+Pauli AG, *Liestal: High Performance Thermal Insulation in Buildings (IEA BCS Annex 39 – Vorphase) (JB)*
- [17] H. Simmler (hans.simmler@empa.ch), EMPA-Dübendorf: *a) Vakuum-Dämmsysteme im Baubereich – Qualitätssicherung und bauphysikalische Grundlagen (Beitrag IEA BCS Annex 39) • b) Wärmelasten transparenter Bauteile und Sonnenschutzsysteme (SB) • c) Messung und Simulation von transparenten Bauteilen mit Sonnenschutz (Beitrag IEA Solar Task 27) (JB)*
- [18] R. Weber (robert.weber@empa.ch), EMPA, *Dübendorf: Vorabklärung zur Herstellung hochisolierender Leitungen (SB) ENET 210190*
- [19] M. Damani/U.Vogt (ulrich.vogt@empa.ch), EMPA, *Dübendorf: Vorabklärung zur Herstellung hochisolierender Keramik-Dämmstoffe (SB)*
- [20] C.U. Brunner (Conrad.U.Brunner@cub.ch), Büro CUB, *Zürich: Richtlinie für Gebäude mit hohem Glasanteil (JB)*
- [21] C. Roulet (Claude.Roulet@epfl.ch), EPF, *Lausanne: ATEMAC, Application des traceurs passifs pour l'étude des mouvements d'air et de contaminants (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: a) Harmonisierung der Nutzungsprofile SIA 382/2 und SWKI 95-3, • b) Entwicklung eines Kälte-Tools zur Methodik SIA 380/4 "Elektrische Energie im Hochbau" (JB)*
- [24] O. Sari (Osmann.Sari@eivd.ch), HES-SO - EIVD, *Yverdon: Version française du logiciel "IDEA 382/3: Preuve des besoins pour les installations de ventilation et climatisation" (SB, März 2001)*
- [25] A. de Martin, G. Zweifel (gzweifel@hta.fhz.ch), SWKI, *Bern: Ein- und Ausgabeprogramm für Berechnung des jährlichen Energiebedarfs von Lüftungstechnischen Anlagen gemäss SWKI-Richtlinie 95-3 (JB)*
- [26] G. Zweifel (gzweifel@hta.fhz.ch), HTA, *Luzern/Horw: IEA/SHC Task 22: Validierung von Simulationsprogrammen (JB)*
- [27] J. Kraus (jens.krauss@csem.ch), CSEM *Neuenburg: Demonbat (Pilotinstallation Neurobat) (JB)*
- [28] J.-M. Chuard (chuard@enerconom.ch), Enerconom, *Bern: Commissioning of Building HVAC Systems for Improved Energy Performance (IEA BCS Annex 40 – Vorphase) (JB)*
- [29] R. Furter (rfurter@hta.fhz.ch), HTA, *Luzern/Horw: Ausarbeitung eines Prüfreplements für Kompakt-Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung und/oder Wärmepumpe (SB)*
- [30] V. Dorer (viktor.dorer@empa.ch), EMPA, *Dübendorf: a) Optimierte Luftheizsysteme für Passivhäuser (JB), • b) Energieeffiziente und bedarfsgerechte Abluftsysteme mit Abwärmenutzung (ENABL) (JB)*

Liste der P+D-Projekte

- [31] Bachmann, Langenick und Partner (ivo.langenick@bluewin.ch), *Hochdorf: DEFH am Birkenweg 8, 6280 Hochdorf (SB)*
- [32] H. Huber (hjhuber@hta.fhz.ch), HTA-Luzern: *Luftheizung mit Holzofen bei einer EFH-Sanierung (SB)*

- [33] J. Bienz (juerg.bienz@chiquet-sopra.ch), Chiquet-Energietechnik, *Ormalingen: Messprojekt Grasswil* (JB)
- [34] W. Hässig (whaessig@BHZ.ch), B+H, *Zürich: Energetische Sanierung einer grossen Wohnsiedlung* (JB)
- [35] R. Naef (naef@iqjzh.com), Naef Energietechnik, *Zürich: a) Öko-Siedlung Melchrüti (Wohnpark Balance Wallisellen)* (JB) ♦ *b) Wohnen in Sunny Woods* (JB)
- [36] Th. Nordmann (clavadetscher@tnc.ch), *Erlenbach: Messprojekt Niedrigenergiehaus Erlenbach*
- [37] Werner Vetsch (vetsch-bauplanung@bluewin.ch), *Grabs: Synergiepark für erneuerbare Energien* (JB)
- [38] W. Setz (setzw@bluewin.ch), Architekt, *Rapperswil: 1. Schweizerischer Wohn- und Gewerbebau im Passivhausstandard* (JB)
- [39] D. Schwarz (schwarz@schwarz-architektur.ch), Architekt, *Domat/Ems: TWD-Fassadenelement mit integriertem Latentwärmespeicher und Sonnenschutz* (JB)
- [40] B. Bossard (barbos@tic.ch), Barbos Bauteam, *Stans: Passiv-Acht-Familienhaus* (JB)
- [41] K. Viridén (viriden@viriden-partner.ch), Viridén+Partner, *Zürich: Passivhaus im Umbau* (JB)
- [42] Ch. Breu (breu_christoph@bluewin.ch), Architekt und Ingenieur, *Rickenbach: Passiv-Mehrfamilienhaus Stämpfli Unterägeri* (JB)
- [43] M. Stüssi (mstuessi@dplanet.ch) *Bargen: Neubau Zweifamilienhaus "Im Tal" 8233 Bargaen SH, Heizung - Warmwasser - Wäschetrocknung mit einer Duplex-Wärmepumpe*
- [44] D. Pahud (daniel.pahud@dct.supsi.ch), LEE-SUPSI, *Trevano: Low Energy Housing in Ticino (Beitrag IEA SHC Task 28)* (JB)
- [45] P. Stähli (Peter.Staehli@swisseconomic.ch), IEM AG, *Gwatt-Thun: Wellness Wärmerückgewinnungsanlage Brauchwarmwasser, Parkhotel Adelboden*
- [46] A. Gütermann (amena.ag@energienetz.ch), amena ag, *Winterthur: a) Integration eines solaren Luftsystems und PV bei einer Gebäudesanierung, Braunwald ♦ b) Integration einer konvektiven Fassade in ein Heimatschutzobjekt, Herisau* (JB)
- [47] E. Hächler (ernst.haechler@suisselectra.ch), Suisselectra, *Basel: Phönix light – Heizen und Kühlen mit PCM*
- [48] F. Gachnang (gachnang@eta-energietechnik.ch), eta Energietechnik, *Winterthur: Deckenstrahlung in Eishallen und überdeckten Ausseneisfeldern*

Referenzen

- [49] M. Zimmermann: *Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden 2000-2003, EMPA ZEN, November 2001*
- [50] Binz, Frank, Fregnan, Hartmann, Manz, Zimmermann, Zweifel: *SIA Dokumentation D 170: Energie im Hochbau, SIA Zürich, 2001*
- [51] M. Zimmermann, M. Erb et al: *High Performance Thermal Insulation Systems, Conference and Workshop Report, EMPA ZEN, January 22-24, 2001*

VERKEHR UND BATTERIEN / SUPERCAPS

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2001

Martin Pulfer

martin.pulfer@bfe.admin.ch



SAM: Dreirädriges Stadtmobil

Entwickelt von der Bieler Firma CREE AG; 80 Stück getestet und erprobt bei Kunden von CO-OP; Reichweite: mehr als 50 km; Spitze: 85 km/h; Energieverbrauch: 5 kWh/100 km, dies entspricht weniger als 1 Liter Benzin pro 100 km.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Der BFE-Bereich *Verkehr* mit seinen Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekten untersucht Ansätze und Massnahmen zur Absenkung des Energieverbrauchs im Verkehr, insbesondere beim Hauptverbraucher, dem motorisierten Individualverkehr. Zusatzziele und Themen, die bei der Ausrichtung der Forschungs-Programme *Verkehr* sowie *Batterien und Supercaps* berücksichtigt werden, sind: Reduktion der Umweltbelastung, Umsetzung mit Schweizer Unternehmen, Chancen für Bildung und Wissenschaft. Eine Verringerung des Energieverbrauchs beim

Individualverkehr kann vor allem mit folgenden Ansätzen erschlossen werden:

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

In dem im Berichtsjahr ausgearbeiteten und von der CORE teilweise genehmigten Konzept für die Technologiebereiche *Verkehr* und *Akkumulatoren* [15] sind die Schwerpunkte entsprechend gesetzt und die Fragen an die Forschung formuliert.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

GRUNDLAGEN

Im Berichtsjahr wurde von den beiden Bundesämtern für Raumentwicklung und für Statistik das **Verkehrsverhalten der Bevölkerung** ausgewertet [1]. Basis hierfür war eine telefonische Befragung von rund 30'000 Personen in 28'000 Haushalten durch das Büro *Link* im Jahr 2000. Dieser *Mikrozensus Verkehrsverhalten* zeigte den hohen Mobilitätsgrad der Schweizer Bevölkerung auf. Rund 125 Milliarden Kilometer legte die Schweizer Bevölkerung im Jahr 2000 im In- und Ausland zurück. Auch die hohe Auto-Mobilität bestätigt sich: Vier Fünftel aller Haushalte besitzt mindestens ein Auto. 52% der Bevölkerung ab 16 Jahren hat kein Abonnement für den öffentlichen Verkehr, aber 35% hat ein Halbtaxabonnement. 90% der Bevölkerung ist täglich min-

destens einmal unterwegs. Jede Person ab 6 Jahren legt pro Jahr im Durchschnitt 17'400 km zurück; davon 10'000 km mit dem PW, 2'600 km per Flugzeug, 2'000 km per Bahn, 630 km zu Fuss, 520 km mit Tram/Bus, 350 km per Velo, 300 km mit dem Reisecar sowie 1'000 km mit den übrigen Verkehrsmitteln. 3'800 km entfallen auf Fahrten im Ausland. Das durchschnittliche Verkehrsaufkommen pro Person und Tag entspricht in der Schweiz folgenden Kennzahlen: mittlere Distanz: 37 km, Unterwegszeit: 85 Min. und die mittlere Anzahl der Wege: 3,6. Für 67% der täglichen Distanzen wird der PW benutzt. 34% der Autofahrten sind kürzer als 3 km und der Besetzungsgrad beträgt durchschnittlich 1,6 Personen. Am häufigsten (40% der Wegetappen) ist man zu Fuss unterwegs.

Die Kennziffern zum Modalsplit lauten:

	Tagesdistanz [km]	Unterwegszeit [Min.]	Anzahl Etappen
Langsamverkehr	7,2	39,8	46,1
Motorisierter Individualverkehr	69,5	43,6	41,6
öffentlicher Verkehr	17,7	11,4	10,3
andere	5,6	5,2	2,0

Insgesamt sind 40% aller Wege Freizeitwege. Sie machen 44% der Tagesdistanz und 49% der täglichen Unterwegszeit aus. Dieser grosse Anteil

des Freizeitverkehrs hängt neben der wachsenden Freizeit auch mit der Bevölkerungsentwicklung zusammen.

Die **täglichen Distanzen und die tägliche Unterwegszeiten** der verschiedenen Altersgruppen sehen wie folgt aus:

Alter	Distanz [km/Tag]	Unterwegszeit [Min./Tag]
6–17 Jahre	23	79
18–25 Jahre	52	96
26–65 Jahre	42	89
66 und mehr	21	66

Die höchste Mobilität weisen die 18- bis 25-Jährigen auf, was auf verschiedene Einflüsse wie Erwerbstätigkeit und Führerscheinwerb zurückzuführen ist. Männer sind in allen Alters- und Erwerbsgruppen deutlich mobiler als Frauen.

Bei Langen Reisen und Flugreisen hat 88% der Bevölkerung im Jahr 2000 mindestens eine Reise mit Übernachtung unternommen. 36% der Befragten hat in den letzten 12 Monaten vor der Befragung eine Flugreise gemacht und mehr als 60% hatte europäische Länder als Ziel. 41% fahren mit der Bahn zum Flughafen und der Anteil der Privatreisen (Ferien) am Flugverkehr ist mit 90% unerwartet hoch.

Verkehrsentwicklung und Verhaltensänderungen: Die Mobilität ist seit 1984, zum Teil auch bedingt durch die Erhebungsmethodik, stark gewachsen. Bei den Tagesdistanzen sind dies vor allem die Fusswege (+71%), das Auto (+34%) und Bus und Tram (+26%). Diese Veränderungen haben aber wenig Auswirkungen auf den Modalsplit.

Bei der **Entwicklung der Mobilitätskennziffern** nahmen von 1984 bis 2000 die Distanzen um +30%, die Wegzeit um +35% und der Mobilitätsgrad um +8%. Deshalb ist es nicht verwunderlich, wenn der Energieverbrauch der Verbrauchergruppe Verkehr bei einem Anteil von 33% am Gesamtenergieverbrauch angelangt ist.

Die **Abblendlichtstudie** der ETH Zürich [2a] befasste sich mit den energetischen Auswirkungen des Fahrens mit eingeschaltetem Abblendlicht am Tag bei heutigen Automobilen auch im Hinblick auf zukünftige technische Entwicklungen. Die Ergebnisse einer einfachen Mittelwertrechnung wurden mit den Resultaten einer quasistationären Simulation verglichen. Für die Berechnung des Motorwirkungsgrades wurde ein Willans-Ansatz verwendet und der Wirkungsgrad des Generators aus einer Kennlinie abge-

schätzt. Verschiedene Fahrzyklen (ECE, EUDC, NEFZ, FTP75) wurden untersucht. Die Resultate der Mittelwertrechnung und der quasistationären Simulation zeigten, dass für heutige Automobile im Alltagsverkehr mit einem Kraftstoffmehrerverbrauch von ca. 0,25 Litern pro 100 km zu rechnen ist. Dieser Wert gilt für ein für Schweizer Verhältnisse durchschnittliches Fahrzeug. Die Art des Fahrzeugs spielt jedoch für den Mehrverbrauch nur eine untergeordnete Rolle. Für zukünftige Fahrzeuge wird sich dieser Mehrbedarf auf etwa die Hälfte reduzieren lassen. Als Hauptursache dafür sind die verminderte Leistungsaufnahme der Lichter und ein verbesserter Generatorwirkungsgrad zu nennen.

LEICHTBAU

Beim im Jahr 2000 gestarteten Projekt **Modul-tec II** der Horlacher AG in Möhlin [3] werden Komponenten für eine selbsttragende Leichtbau-Karosserie aus Kunststoff entwickelt. Die Präsentationen des Projektes an der 4. europäischen Automobilkonferenz in Bad Nauheim und an der Fachtagung des internationalen Expertenkreises in Stuttgart sind wegweisend für die weiteren Arbeiten und die Umsetzung des Projektes. In Kleinserien sind Muster aus einer Carbon-Sandwichstruktur als statisches Bauteil für ein Fahrzeug eines grossen deutschen Automobilherstellers gefertigt worden. In diesem Zusammenhang werden auch die Möglichkeiten einer komplett aus Einzelmodulen bestehenden selbsttragenden Kunststoffkarosserie oder einer Hybridkarosserie aus einem Space-Frame-Grundelement mit einzelnen Kunststoffmodulen evaluiert. Diese Bauteile werden aufgrund ihrer Multifunktionalität das Gesamtgewicht eines Fahrzeuges beträchtlich senken.

In Zusammenarbeit mit einem grossen Schweizer Zulieferer der Autoindustrie sind verschiedene Module modellspezifisch entwickelt und anschliessend der Automobilindustrie präsentiert worden. Nebst GMT (glass mat reinforced thermoplastics) wurde auch LFT (long fibre thermoplastics) bezüglich Verarbeitbarkeit und Materialeigenschaften untersucht. Der Fasergehalt kann dabei auf das Bauteil und seine Belastung abgestimmt werden. Die LFT-Extrusionstechnik ist aufgrund der einfacheren Verfahrenstechnik für die Serienproduktion prädestiniert, da das Material direkt aus dem Extruder in das Presswerkzeug gespritzt wird und nicht wie bei den GMT-Fasermatten zuerst separat in einem Ofen vorgeheizt werden muss. Ne-

ben Stäbchengranulat kann die LFT-Anlage auch direkt mit Recyclingmaterial gefüllt werden. Demgegenüber ist GMT aufgrund seines homogeneren Fasergehaltes weitaus belastbarer als LFT. Die Belastbarkeit von GMT kann durch eine Orientierung des Fasern in Belastungsrichtung oder durch eine gezielte Erhöhung des Faseranteils zusätzlich erhöht werden.

Basierend auf den Forschungsergebnissen wurde das *Modultec*-Bauteil weiter optimiert und als zusätzliche Funktionserweiterung die Integration einer kapillaren Druckspeicherung verfolgt. Diese Idee wurde im Dezember des Berichtjahres von der Hans E. Moppert-Stiftung für nachhaltige Entwicklung der Bank Sarasin mit dem 3. Preis ausgezeichnet. Das Ziel hierbei ist die Nutzung der vorhandenen Hohlräume, die jedes Bauteil aufweist, als Energiespeicher für Druckluft.

Ziel für das nächste Jahr wird unter anderem die Herstellung eines skalierten *Modultec*-Space-Frame-Funktionsmusters sein, mit dem verschiedene Konzepte realisiert werden können. Weitere Bodengruppen mit verschiedenen Faseranteilen werden hergestellt und erprobt.

ANTRIEBE

Das *Palos II* Projekt der ETH-Zürich [2b] befasst sich mit der Erhöhung des Teillastwirkungsgrades von Antriebssystemen. Das Projekt ist in zwei Teilprojekte gegliedert:

Aufladung: Eine Aufladung des Verbrennungsmotors ermöglicht die Verwendung eines hubraumreduzierten Motors. Dies ergibt bessere Wirkungsgrade in der Teillast, jedoch eine schlechtere Dynamik des Fahrzeugs (wichtig für die Käuferakzeptanz). 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- und 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 regelungstechnisch orientierte Darstellung der physikalischen Zusammenhänge hergeleitet. Dieses Modell ist in der graphischen Benutzeroberfläche Matlab/Simulink™ für Simulationen zugänglich und ermöglicht so eine effiziente

Untersuchung von Steuer- und Regelalgorithmen. Erste Resultate sind erfolgversprechend.

Der Aufbau eines Versuchsträgers erfolgt langsamer als erhofft. Ein serienmässig mit Abgasturbolader ausgerüsteter Motor wurde an einem dynamischen Prüfstand aufgebaut. Bevor ein neuentwickelter Druckwellenlader an den Motor angepasst wird, wird der Ausgangsmotor für einen späteren Vergleich gründlich vermessen. Diese Arbeiten stehen erst am Anfang.

Nebenaggregate: Durch die Einführung eines 42 V Bordnetzes wird die Elektrifizierung vieler Nebenaggregate möglich (z.B. Wasserpumpe, Klimakompressor). Die neuen Freiheitsgrade ermöglichen ein Nebenaggregate-Management. Dabei steht der Kaltstart des Verbrennungsmotors im Vordergrund, da durch erhöhte Reibung tiefere Wirkungsgrade resultieren. Geeignete Aufheizmassnahmen und Regelstrategien kommen nicht nur der Lebensdauer des Motors und dem Kraftstoffverbrauch zu Gute, sondern ermöglichen auch ein schnelleres Aufheizen des Fahrgastraumes und führen damit auch zu einer Erhöhung der Sicherheit (schnelleres Enteisen der Windschutzscheibe, verbesserte Konzentration des Fahrers).

Das Ziel des *Bresa*-Projektes des PSI-Villigen [4] ist die Entwicklung eines Antriebsstrangs für einen vollwertigen Personenwagen, der aus Brennstoffzellen und Superkondensatoren (Supercaps) besteht. Als Treibstoff dieses Antriebes wurde Wasserstoff gewählt, der gasförmig in Druckflaschen komprimiert wird (s. Figur 1).



Figur 1: Das BRESA-Fahrzeug auf Basis der familien-tauglichen Bora Limousine auf einer ersten Testfahrt.

In einem Teilprojekt werden in Zusammenarbeit zwischen dem PSI und der ETH-Zürich die **Brennstoffzellenstapel** für diesen Antriebs-

strang entwickelt und aufgebaut. Neue Materialien und Herstellverfahren werden erprobt, um den Platzbedarf und die Kosten für die Herstellung zu reduzieren. Weiter werden Anstrengungen unternommen, um die Membran-Elektroden-Einheit bei gleichbleibender Leistung kostengünstiger herzustellen. Dazu werden neue elektrochemische Ansätze erforscht.

In einem weiteren Teilprojekt werden **Supercaps** als Kurzzeitenergiespeicher entwickelt, die bei guten spezifischen Leistungswerten auch verbesserte Energiedichten erzielen. Dazu werden am PSI Elektroden weiterentwickelt. Die Umsetzung der Elektroden in fertige Supercap-Zellen wird in Zusammenarbeit mit der Firma *Montena SA* durchgeführt. Neben der eigentlichen Supercap-Entwicklung stellt sich auch die Frage des Ladungsausgleichs zwischen den verschiedenen Zellen. Dazu wurde in einer Zusammenarbeit zwischen dem PSI, der EPFL und *Montena SA* ein Modul entwickelt, das die Ladungsbilanz zwischen 5 Supercap-Zellen ausgleichen kann.

Um Energiequelle und -speicher mit einem Elektromotor koppeln zu können, ist eine **Leistungselektronik** erforderlich, die die Anpassung der verschiedenen Spannungsniveaus ermöglicht und den Stromfluss regelt. Dazu wurde an der ETH Zürich ein DCDC-Wandler entwickelt, der auf die erforderlichen Leistungen abgestimmt ist, und minimale Verluste aufweist.

Um die Komponenten als **System** betreiben zu können, bedarf es einiger Nebenaggregate wie

Luftverdichtung, Luftbefeuchtung, Wasserstoffversorgung, Wasserstoffzirkulation und Kühlung der Komponenten. All diese Komponenten müssen mit einem Steuerungssystem zu einem Gesamtsystem vereint werden. Die Nebenaggregate wurden teilweise am PSI und bei der FEV Motorenteknik GmbH entwickelt. Das Steuerungssystem und die Software wurde an der ETH Zürich entwickelt. Das Gesamtsystem wurde zuerst im Massstab von ca. 1:6 aufgebaut und erprobt, bevor es im realen Massstab in Angriff genommen wurde.

AKKUMULATOREN

Die *MES DEA AG* in Stabio TI (Fig. 2) verbessert die Energiedichte der **Zebrabatterie** [5a]. Die Erhöhung der spezifischen Energie einer Batterie (Einheit: Wh/kg) kann durch Verbesserung der chemischen Energiedichte und/oder durch Absenkung der Batteriemasse erzielt werden. In einer Parameterstudie wurde jede einzelne Komponente der ZEBRA-Zelle auf sein Potenzial zur **Gewichtsreduzierung** hin untersucht, wobei Leistung und Zuverlässigkeit nicht verschlechtert werden durften. Der Keramik-Elektrolyt bietet ein grosses Potenzial zu dessen Realisierung jedoch erhebliche Arbeiten an den Herstellungsprozessen notwendig wären. Daher wurde die Keramik beibehalten. Alle anderen Komponenten wurden optimiert, was eine Gewichtsreduktion von ca. 8% auf die Zelle und von ca. 6% auf die gesamte Batterie erlaubt.



Figur 2: Die imposante neue Fabrikationshalle für die Zebrabatterie.

Ein umfangreiches Versuchsprogramm zur **Erhöhung des Energieinhaltes** führte zu einer Modifikation der Rezeptur des Kathodenmaterials, die zu ca. 18% mehr Energieinhalt führt. Dabei konnte auf den unerwünschten Schwefel ganz verzichtet werden. Ein *design-freeze* wurde inzwischen vorgenommen und die Langzeitversuche begonnen, um die Stabilität der geänderten Rezeptur nachzuweisen.

Zur besseren Ausnutzung alternder Batterien und zur Berücksichtigung des geänderten Ka-

thodenmaterials wurde ein Software-Algorithmus entwickelt, der unabhängig vom Ladungszähler das Entladeende erkennt und die Kapazitätsanzeige entsprechend korrigiert. Dieser Algorithmus befindet sich zur Zeit im Test in Fahrzeugen. Auch der Schnelllade-Algorithmus muss speziell im Hinblick auf die Anforderungen im Hybridbetrieb eines Stadtbusses modifiziert werden. Die Arbeiten sind im Zeitplan und werden planmässig Ende 2002 abgeschlossen.

Nationale Zusammenarbeit

Durch die Reorganisation des BFE und die Lancierung des Programmes EnergieSchweiz als Nachfolgeprogramm von Energie 2000 ergaben sich verbesserte, nähere Strukturen mit reduzierten Reibungsverlusten. Durch den Umzug des BFE nach Ittigen verbesserte sich durch die neue geographische Nähe die schon enge thematische Zusammenarbeit mit dem ASTRA und dem

BUWAL. Mit den nicht ausschliesslich auf den Gebäudebereich fokussierten Kantonen beider Basel, Bern, Luzern und Tessin konnte die umsetzungsorientierte Projektarbeit zielgerichtet fortgesetzt werden. Aus der Sicht der Forschung war die Zusammenarbeit mit der ETH-Zürich, dem PSI und den Fachhochschulen Bern und Zentralschweiz besonders fruchtbar.

Internationale Zusammenarbeit

Die Integration der Versuchsanlage in Mendrisio in die **EU-Forschung** konnte im Laufe des Berichtsjahres verstärkt eingebracht und genutzt werden:

Dabei ist zum Projekt **UTOPIA**, in welchem Evaluationsinstrumente für innovative Verkehrssysteme entwickelt und getestet werden, der Schlussbericht erarbeitet worden.

Im Projekt **E-TOUR** (Electric Two Wheelers on Urban Roads) werden die Untersuchungen zum Mobilitätsverhalten von Nutzerinnen und Nutzern von Elektro-Zweirädern (in Brüssel, Rotterdam, Barcelona, Stockholm, Capri, Mykonos, Basel und Mendrisio) fortgesetzt. In Basel hat hierzu ein zweitägige Tagung stattgefunden. Schwerpunkte der Tagung waren das Basler Projekt mit seinen mittlerweile über 400 E-Bikes, den hierzu eingesetzten Förderansätzen und den gewonnenen Erfahrungen .

Am 1. Juli 2001 ist der offizielle Start von **CLEANER DRIVE**, einem Forschungs- und Demonstrationsprojekt für die Beschleunigung der Markt-

einführung von *New Generation Vehicles* erfolgt. Aus der Schweiz beteiligen sich daran die *Fondazione VEL* mit dem kantonalen Förderprogramm *VEL2* im Kanton Tessin und der Verband e'mobile mit der Adaption von *VEL2* auf die anderen Landesteile und mit der Übertragung der Ergebnisse im Ausland auf die Schweiz. Das Projekt ist an einer Pressekonferenz anlässlich des Genfer Autosalons vorgestellt worden.

Ein Consortium unter der Leitung der Freien Universität Brüssel hat ein neues Forschungs- und Demonstrationsprojekt unter dem Namen **PHYBIKE** eingereicht. Das Hauptthema ist die Optimierung der Abstimmung des Antriebssystems von E-Bikes auf die Biomechanik der FahrerIn bzw. des Fahrers. Die HTA-Biel wird die im Projekt *Intellibike* gewonnenen Erkenntnisse einbringen. Weitere Themen sind Analyse und Verbesserung der Beziehungen innerhalb der Anbieterkette (Hersteller, Importeur, Händler) und ein Demonstrationsprogramm mit Batterie-wechsel-Stationen für E-Bikes.

Vom 20. bis 24. Oktober 2001 hat in Berlin das **18. Electric Vehicle Symposium** (s. www.emobile.ch/d/presse/presstexte/2001/EVS-18.html) stattgefunden. Der Anlass ist mit einer vielbeachteten Parade der Elektrofahrzeuge auf der abgesperrten Strecke vom Kurfürstendamm zum Potsdamer-Platz gestartet worden (Figur 3). Die mehreren zehntausend Zuschauer und Passanten haben erstaunt bemerkt, wie der Lärmpegel während dieser Parade zusammengebrochen ist. An der Ausstellung und am Symposium hat sich der kontinuierliche Fortschritt bei diesen Fahrzeugen (Elektroantrieb mit Batterie oder Brennstoffzelle, Hybrid, Erdgas) manifestiert. Der Vortrag des Tessiner Regierungsrat Boradori über den Grossversuch in Mendrisio und das Nachfolgeprojekt im gesamten Kanton Tessin hat grosses Interesse geweckt.

In verschiedenen Vorträgen am Symposium wurde deutlich, dass die technischen Probleme mit der Wasserstoff-Brennstoffzelle nach und nach gelöst werden und dass das eigentliche Problem – die Umstellung auf die nachhaltige Wasserstoffwirtschaft – ein wirtschaftliches ist. Der Schweizer Gemeinschaftsstand, der insbesondere vom BFE geförderte Produkte und Projekte präsentiert hat, war einer der meist besuchten Stände der Ausstellung und viele neue Wirtschafts- resp. Forschungskontakte wurden vermittelt. An den anschliessenden Sitzungen des *Implementing Agreement for Hybrid- and Electric Vehicle* der IEA haben insbesondere Italien und Japan starke Forschungs- und Förderprogramme für diese alternativen Antriebstechnologien präsentiert.



Figur 3: LEM-Parade unter anderem mit einer stattlichen Anzahl Twikes- am 18. Electric Vehicle-Symposium in Berlin

Im Folgejahr werden auf internationaler Ebene die Untersuchungen zum Mobilitätsverhalten fortgesetzt, u.a. im Rahmen des EU-Projektes

E-TOUR. Damit sollen die vorliegenden Ergebnisse auch statistisch breiter und sicherer abgestützt werden.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

GROSSVERSUCH MIT LEICHT-ELEKTROMOBILEN

Am 30. Juni 2001 ist der Grossversuch **Veicoli Elettrici Leggeri (VEL)** [6] mit Leicht-Elektromobilen (LEM) in Mendrisio nach sechs

Jahren offiziell beendet und ins Projekt VEL überführt worden. Die Projektverantwortung trug der Verein *AssoVEL*, der für die Durchführung des Versuchs gegründet worden war. Während der sechs Projektjahre von VEL sind

total 458 LEM als neue Fahrzeuge gekauft worden, 93 Fahrzeuge wurden wieder aus dem Verkehr gezogen und davon wurden 30 als Gebrauchtwagen innerhalb des Grossversuchs weiterverkauft. Somit sind noch 395 Fahrzeuge in Verkehr. Den grössten Anteil hatten die Personenwagen mit 132 Fahrzeugen oder 34%. Das meist verkaufte Modell war der Peugeot 106 electric. Mit 24% und 23% fanden jedoch auch die Elektro-Scooter respektive die Elektro-Bikes ein beachtliches Interesse. Die 2-Rad-Fahrzeuge insgesamt erreichten somit einen grösseren Anteil als die Personenwagen und die Nutzfahrzeuge (28 Fahrzeuge oder 7%) zusammen. Im Berichtsjahr konnten im Rahmen des Grossversuchs zudem 16 Hybridfahrzeuge in Verkehr gesetzt werden, welche Ende 2000 als erstes Modell in der Schweiz auf den Markt kamen. Bei Projektende lagen 344 Gesuche aus allen Teilen des Kantons vor, die im Rahmen des Folgeprojekts VEL2 behandelt wurden.

Seit April 1997 bestand die Möglichkeit, Beiträge auch an Interessierte ausserhalb des ursprünglich festgelegten Gebiets zu entrichten, solange die Kredite für das Versuchsgebiet nicht ausgeschöpft waren. In Mendrisio und den acht angrenzenden Gemeinden verkehrten bei Projektende 121 LEM oder 31% der Flotte, 27% wovon mehrheitlich E-Scooter entfielen auf das Luganese und je gut 20% auf das übrige Mendrisiotto respektive den Sopraceneri. Mit der Bewilligung von Fahrzeugbeiträgen auch ausserhalb des Grossversuchsgebietes war die ursprünglich vorgegebene **LEM-Dichte** von 8% des Motorfahrzeugbestandes nicht mehr zu erreichen. In Mendrisio betrug die LEM-Dichte Mitte 2001 1,8%.

64% der LEM wurden als zusätzliche Fahrzeuge gekauft und 46% ersetzten ein herkömmliches Fahrzeug. Zwei- und dreirädrige LEM wurden sogar in 72% der Fälle als zusätzliche Fahrzeuge gekauft. Die Hälfte der LEM-Personenwagen ersetzte hingegen ein herkömmliches Fahrzeug. Die Fahrleistung aller LEM im Tessin betrug im Monatsdurchschnitt 440 km und wies eine breite Streuung auf, sowohl zwischen als auch innerhalb der einzelnen Fahrzeugarten respektive zwischen Privat- und Firmenfahrzeugen. Der durchschnittliche Energieverbrauch lag bei 25,5 kWh/100 km für Personenwagen mit 3-4 Sitzplätzen und 23,1 kWh/100 km für Personenwagen mit 1-2 Plätzen. Nutzfahrzeuge verbrauchten im Durchschnitt 36,4 kWh/100 km und Scooter 8,4 kWh/100km. Statistisch gesicherte Daten liegen für eine Gesamtbeurteilung

der **Energie- und Umweltwirkungen** zwar noch nicht vor, die bisherigen Erhebungen und Berechnungen deuten aber darauf hin, dass die LEM trotz einer Zunahme der gesamten Fahrleistung in den Privathaushalten einen Beitrag zur Senkung des Energieverbrauchs und der verursachten Emissionen im Strassenverkehr leisten.

Eine Beurteilung des Grossversuchs als Pilot- und Demonstrationsprojekt nimmt der **Synthesebericht** [6] vor, der im Oktober 2001 veröffentlicht worden ist. Gleichzeitig ist eine **CD-ROM** erschienen, auf welcher unter anderem 30 der wichtigsten Berichte der Forschungskommission enthalten sind. Der Synthesebericht fasst diese Berichte zusammen und gilt als Schlussbericht. Die bisherigen Erkenntnisse aus dem Grossversuch sind am *Internationalen Symposium für Elektro- und Hybridfahrzeuge* EVS-18 in Berlin präsentiert worden. An der begleitenden Ausstellung war die Schweiz auch mit einem Gemeinschaftsstand unter der Leitung des *InfoVEL* Mendrisio vertreten. Zusammenfassend hält der Synthesebericht fest, dass der Grossversuch den vielfältigen und sinnvollen Einsatz von LEM demonstriert hat. Rund 30 Fördermassnahmen wurden eingeführt, getestet und evaluiert. Ferner erlaubt das Projekt eine Beurteilung des Mobilitätsverhaltens der LEM-Fahrerinnen und -Fahrer sowie der Umweltwirkungen. Damit beantwortet der Grossversuch alle drei Hauptfragestellungen.

Während den letzten Monaten des Grossversuchs konzentrierten sich die Aktivitäten zu einem wesentlichen Teil auf die Vorbereitung des Folgeprojektes **VEL2**, für welches der Tessiner Grossrat Ende März 2001 den Kredit bewilligte. Offiziell startete VEL2 am 1. Juli 2001. Die eigentliche Lancierung markierte jedoch das ExpoVEL im Oktober 2001. Wie der Grossversuch zielt VEL2 auf eine Sensibilisierung der Bevölkerung für energieeffiziente Fahrzeuge im ganzen Kanton Tessin ab. Jährlich werden Beiträge nach fixen Ansätzen an 1'000 effiziente Fahrzeuge gewährt. Gefördert werden alle Fahrzeuge der EU-Klassen M1 und N1, die weniger als 120 g CO₂ / km verursachen und die Emissionswerte Euro 4 erfüllen, die ab 2005 obligatorisch sind. Das Folgeprojekt zum Grossversuch soll die Brücke zu VEL3 schlagen und auf dieses vorbereiten. Für VEL3 ist ab 2005 ein Bonus-Malus-System vorgesehen, für welches die gesetzlichen Grundlagen im Tessin zurzeit fehlen.

Mit VEL2 können Mendrisio und der Kanton Tessin ihren internationalen Namen als **Kompe-**

tenzzentrum für Elektro- und andere effiziente Fahrzeuge ausbauen. Unter anderem auch dank der internationalen Ausstrahlung hat der Grossversuch der Region spürbare wirtschaftliche Impulse gegeben. Das wachsende Interesse an den Erkenntnissen aus diesem Pilot- und Demonstrationsprojekt geht zu einem wesentlichen Teil auf seinen marktwirtschaftlichen Ansatz zurück. Auf kantonaler und regionaler Ebene hat der Grossversuch eine deutliche Sensibilisierung für die Auswirkungen des Strassenverkehrs auf die Umwelt bewirkt. Dies zeigt sich darin, dass sich dieser Kanton mit dem höchsten Motorisierungsgrad in der Schweiz in den letzten Monaten vermehrt für autofreie Tage und ein Gesamtkonzept eingesetzt hat.

Gleichzeitig mit dem Grossversuch haben auch die **Partnergemeinden Muttenz, Riehen, Sion, Wil (SG) und Wohlen (BE)** ihre Projekte beendet. Die Erkenntnisse aus diesen Projekten sind in mehrere Berichte der Begleituntersuchungen und in die Gesamtbeurteilung im Synthesebericht [6] eingeflossen. Projektbeschreibung und eine Beurteilung durch die Projektverantwortlichen der einzelnen Gemeinden sind auf der CD-ROM enthalten.

Bei Projektende verkehrten in **Muttenz** 60 LEM. Darunter sind im Vergleich zu den anderen Partnergemeinden viele Personenwagen. In den letzten Monaten war jedoch ein steigendes Interesse an Elektro-Zweirädern zu beobachten. Ein Folgeprojekt, das die Förderung von E-Bikes und E-Scootern an höheren Schulen zum Inhalt hat, trägt dieser Entwicklung Rechnung. Die offizielle Abschlussveranstaltung im September fand gemeinsam mit Riehen statt. An dieser haben unter anderem die kantonalen und kommunalen Behörden Bilanz gezogen. In **Riehen** sind total 47 LEM in Verkehr gesetzt worden. Auch hier fanden in den letzten Projektmonaten vor allem E-Bikes und E-Scooter eine Käufer-schaft. Mit der Lancierung von NewRide Basel, das einen Fahrzeugbeitrag von 10% des Kaufpreises beinhaltet, findet die Förderung von Elektro-Zweirädern ab Frühjahr 2002 im ganzen Kanton Basel-Stadt eine Fortsetzung.

Bereits im Frühjahr 2001 hat der Kanton Bern das Programm *NewRide* lanciert. Für **Wohlen** stellt dies einen Teil des Folgeprojekts dar. Bis zum Projektabschluss zählte die Berner Vorortsgemeinde 103 LEM. Davon waren 44 E-Bikes und 31 E-Scooter. Damit erwiesen sich die Zweiräder als die klar beliebtesten Fahrzeuge.

Wil hat sein LEM-Projekt im Oktober 2001 mit einer Schlussveranstaltung offiziell beendet. In den letzten Jahren sind kaum mehr Beitrags-gesuche eingegangen, so dass bei Projektschluss 29 LEM verkehrten. Wil weist von allen Partnergemeinden den prozentual höchsten Anteil von Personenwagen auf, die alle in den ersten Projektjahren in Verkehr gesetzt worden sind.

In **Sion** erhielten total 29 LEM Beiträge. Mit 20 Fahrzeugen überwiegen hier die Scooter. Die Hochschule Wallis in Sion hat ein induktives Ladesystem bis zum Prototyp-Stadium entwickelt. Als Energiestadt und im Rahmen der Lokalen Agenda 21 fördert Sion auch in Zukunft LEM und namentlich die Elektro-Zweiräder sowie andere umweltfreundliche Fahrzeuge auch nach dem offiziellen Abschluss des LEM-Projektes im Frühling 2002.

ÜBRIGE PROJEKTE

Im Herbst 1998 startete in der Walliser Gemeinde Martigny das Projekt *CityCar* [7] und schloss Mitte 2001 ab. Dieses vom Betreiber POSTAUTO SCHWEIZ, dem Kanton Wallis, der Standort-gemeinde und dem BFE finanzierte Projekt ermöglichte mit 30 öffentlich zugänglichen Elektrofahrzeugen und 21 über das ganze Gemeindegebiet verteilten *CityCar*-Stationen einen energiebewussten Individualverkehr in der Agglomeration. Vorerst standen die 2-plätzig-Kompakt-Fahrzeuge den Testfahrern und -fah-rinnen kostenlos zur Verfügung. Am Ende dieser Phase benutzten über 300 Personen die Elektro-fahrzeuge regelmässig.

Mit der Einführung der **Tarifierung** auf den 1. Mai 2000 nahm die Benutzerfrequenz jedoch markant ab. Die Stadt erwies sich als zu klein, um eine genügend grosse Nachfrage für ein solches Fahrzeugangebot entstehen zu lassen und um das System wirtschaftlich zu betreiben. Zudem sind grössere technische Schwierigkeiten mit den Fahrzeugen entstanden als zu Projektbeginn erwartet wurde. Dies hält auch der Bericht der ETH-Lausanne [7] zur Bewertung des Pilotprojekts fest.

Im Vordergrund standen jedoch nicht wirtschaftliche Aspekte sondern die **technische Machbarkeit**. Gemäss dem Bericht hat das Pilot- und Demonstrationsprojekt gezeigt, dass die einzelnen Komponenten wie das Navigations- und das Reservationssystem funktionieren. Das System und die damit in Martigny gemachten Erfahrungen stossen sowohl bei Stadtbehörden im In-

und Ausland als auch bei der Automobilindustrie auf ungebrochen grosses Interesse. Die POST-AUTO SCHWEIZ beabsichtigt nun, in einer grösseren Stadt das System unter **Marktbedingungen** zu testen. Für einen erfolgreichen Einsatz des Systems ist ein langfristiges Engagement zur Übernahme der Investitions- und Betriebskosten durch Dritte nötig. Weiter sind ein ausreichendes Kundenpotential und geeignete Rahmenbedingungen bei Verkehr und Umwelt Voraussetzung. Schliesslich sind flankierende Massnahmen namentlich im Bereich der Verkehrsberuhigung unabdingbar.



Figur 4: Der von der Bieler Firma CREE AG entwickelte SAM.

Unterstützt durch das BUWAL und das BFE entwickelt die Bieler Firma *CREE AG* den **SAM** [8] (s. Titelbild und Fig. 4), ein dreirädriges Stadtmobil mit den folgenden Eigenschaften: Die Karosserie besteht aus 4 Kunststoffteilen aus HDPE, einem Thermoplasten der problemlos recycelbar ist. Dabei werden die einzelnen Elemente ähnlich wie bei den Osterhasen die Schokolade in einem Rotationsgussprozess geformt. Der Energiespeicher besteht aus 14 modernen Bleivlies Batterien. Die Ladezeit beträgt für 40% eine Stunde, für 70% zwei Stunden und für 100% sechs Stunden. Bei voller Ladung beträgt die Reichweite des Fahrzeuges ca. 50 km und die elektronisch begrenzte Maximalgeschwindigkeit 85 km/h. Der Energieverbrauch beträgt ca. 5 kWh/100 km. Im Spätsommer sind 80 von COOP finanzierte SAM in Heim- und Hobbymärkten den interessierten Probefahrern zum Test zur Verfügung gestellt worden. Diese Erfahrungen werden von *CREE* und ihren Partnern ausgewertet und als Verbesserungen in das künftige Fahrzeug eingebracht.

Das von der Fachhochschule-Biel u.a. für die *World Solar Challenge* in Australien entwickelte Renn-Elektro-Velo **Intellibike** [9] stiess bei seinen Auftritten in der Schweiz und Australien auf

sehr grosses Interesse. Das *Intellibike*, bestehend aus einem Kohlefaserrahmen, weist folgende beeindruckende Kenndaten auf:

- Leistung Radnabenmotor: 775 W Dauer- resp. 1'000 W Peak-Leistung
- Wirkungsgrad: 96 % bei 570 U/Min und 13 Nm
- Energiedichte der Lithium Polymer Batterie: 180 Wh/kg
- Geschwindigkeit: 71 km/h bei 250 W Leistung des Fahrers und 775 W Motorleistung
- Energie-Verbrauch: 1,8 kWh/100 km, ermittelt über 3'025 km und bei einer mittleren Geschwindigkeit von 66 km/h.
- Reichweite: mehr als 200 km bei 45 km/h und 200 W Fahrerleistung
- Intelligente Motorsteuerung: berücksichtigt u.a. Tretfrequenz, Fahrerleistung und Herzfrequenz



Figur 5: Das Intellibike bei einer Demonstrationsfahrt: Sport weckt Emotionen und erleichtert die Umsetzung der Forschungsarbeiten wesentlich.

Zwei *Intellibikes* haben Australien im Rahmen der WSC mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 66 km/h durchquert und benötigten auf der Distanz von 3'025 km nur je 66 kWh Energie. Weitere Rekordfahrten sollen im Folgejahr dem Publikum das Potential und mögliche Anwendungen demonstrieren. Für eine allfällige kom-

merzielle Umsetzung muss das Leistungspotential des Bikes wesentlich abgeschwächt werden. Dadurch könnten aber auch neue Anwendungen mit Zusatznutzen erschlossen werden: Verdeck als Regenschutz, Anwendung als reines Mofa, Zugfahrzeug für Materialtransport etc.

Die Realisierung des Kleinbusses **Tohyco** [10] an der HTA-Zentralschweiz mit Superkondensatoren strebt trotz Verzögerungen dem erfolgreichen Abschluss entgegen. Die entwickelte virtuelle Parallelschaltung, welche Ladungsausgleichs- und Schutzfunktionen für die SCAP übernimmt, ist in grosser Stückzahl und kostengünstig produziert und vor dem Modulzusammenbau auf einem eigens entwickelten Testgerät funktionsgeprüft worden. Die Disposition des Fahrzeuges ist nun im Detail definitiv festgelegt. Damit ist auch die konstruktive Gestaltung der 16 SCAP-Module definiert. Um eine optimale Modulkühlung zu erreichen und zur Optimierung des Kühlsystems, sind an der HTA Kühlluftmessungen durchgeführt worden. Der Modulaufbau ist durch ein Probemodul im Hybridfahrzeug *Blue-Angel* der HTA, einem ehemaligen Forschungsprojekt des BFE, getestet worden. Gleichzeitig verfügt dieses Fahrzeug nun über einen verbesserten SCAP Speicher, der einen ca. viermal höheren Energieinhalt aufweist. Die Massenerstellung der SCAP-Elektronik wird zusammen mit dem Hauptpartner *Montena SA* vorangetrieben. Verschiedene Öffentlichkeitsarbeiten haben stattgefunden, wie etwa die Teilnahme an der EVS-18 in Berlin. Der Kleinbus wird voraussichtlich im April 02 der Öffentlichkeit vorgestellt.

Die Firma *Sytrel* in Colombier hat das Elektromofa **Mobitec** [11] zur Produktionsreife entwickelt. Basis dieser Entwicklung ist ein älteres Projekt, das 1992 das damalige Bundesamt für Energiewirtschaft (heute BFE) mitunterstützt hat. Dieser Prototyp hat als Versuchsträger für den Test von 12 Batteriesystemen gedient. Für die kostengünstige Variante mit einer wartungsfreien Bleibatterie ist schliesslich ein System entwickelt worden, das es erlaubt, die mittlere Batterie-Lebenszeit von anfänglich nur 6 bis 9 Monaten auf 18 bis 24 Monate zu erhöhen. Damit das Fahrzeug wirtschaftlich hergestellt werden kann, ist seine Fertigung in einem Tieflohmland angestrebt worden. Hierfür ist 2001 ein wesentlich überarbeitetes Modell entwickelt worden. Nach Sondierungen in Indien und China hat sich *Sytrel* entschieden, mit einer speziell zur Herstellung dieses Elektro-Mofas gegründeten Vereinigung namens *Jinan Yuxing Technology &*

Science Developing Corporation in Jinan (China) weiter zu arbeiten. Unter Anderem dank der Unterstützung des BFE und weiteren privaten Sponsoren ist Ende Jahr die erste Fahrzeug-Vorserie für USD 45'177 bestellt worden. Im kommenden Februar wird *Sytrel* in Jinan die Fabrikation bei der chinesischen Partnerfirma kontrollieren. Sobald die Vorseriefahrzeuge in der Schweiz sind, werden sie getestet und homologiert. Zusätzlich wird an der Fachhochschule-Biel der Energieverbrauch ermittelt.

Das Ladegerät **BALADUM** [12] (Batterie-Ladegerät mit automatischer Umschaltung zur Ladung von Batterien welche aus mehreren in Serie geschalteten Batterieblöcken besteht.) wurde von der HTA-Biel entwickelt. Die Idee wurde bereits zum Patent angemeldet. Das Ladegerät besteht aus einem Leistungsblock von 12 V und mehreren elektronischen Schaltern. Damit können der Reihe nach mehrere Batterieblöcke für eine Dauer von etwa 0,5 bis 5 Minuten geladen werden. Die einzelnen Teilladungen entsprechen einem kleinen Bruchteil der Gesamtkapazität. Nach dem letzten Batterieblock kommt automatisch wieder der erste an die Reihe. Der ganze Ladevorgang dauert so lange, bis alle Batterien auf den gewünschten Ladezustand gebracht sind. Das Funktionsprinzip konnte auf einem Prüfstand dargestellt werden. Ein derartiges Ladegerät wurde bereits in einen *Mini-El* eingebaut. Mit diesem Gerät können zwei Erkenntnisse kostengünstig umgesetzt werden: 1. Hohe Ladeströme verbessern die Lebensdauer von Batterien! 2. Die Spannung des einzelnen Batterieblockes muss sicher kontrolliert werden! Erste Resultate zeigen, dass der Wasserverbrauch von wartungsfreien Batterien mit dem neuen Ladeverfahren drastisch reduziert wird. Damit wird die Gefahr einer vorzeitigen Alterung durch Gitterkorrosion deutlich gesenkt.

Seit Mai 2000 verkehrt die Solarfähre **Helio** [13] zwischen der Badenwürttembergischen Gemeinde Gaienhofen und Steckborn am Untersee. Seit seiner Taufe erfreut sich der moderne Katamaran aus Edelstahl grosser Beliebtheit bei Urlaubern und Einheimischen. Gemeinsam mit der traditionellen Höri-Fähre garantierte die Solarfähre im Sommer täglich die Überfahrt zwischen deutschem und schweizerischem Ufer. Die *Bodensee-Stiftung* organisierte gemeinsam mit dem *Verein Solarfähre Untersee* den Einsatz der *Helio* im Fährdienst und als Ausflugs- und Exkursions-schiff. Insgesamt konnten über 8500 Fahrgäste und 2000 Velos transportiert werden. Besonde-

rer Wert wurde neben dem Fährdienst auf naturkundliche Ausfahrten gelegt. Die Solarfähre wurde von Schulklassen als Plattform für Pressekonferenzen, für Ausflüge auf dem Untersee und als Raum für besondere und aussergewöhnliche Schifffahrten genutzt.

Dank der Mitarbeit der Umweltstiftung der Allianz-Versicherung, der Kopf AG, der Bodensee Solarboot GmbH & Co. KG sowie der Unterstützung durch das Bundesamt für Energie und der Landesregierung von Baden-Württemberg konnte sich die *Helio* in der Fährsaison 2001 als fester Bestandteil des Schiffsverkehrs auf dem Untersee etablieren. Die innovative Idee und deren Umsetzung wurden von der Internationalen Bodenseekonferenz mit einem Preis im Nachhaltigkeitswettbewerb ausgezeichnet. Die Solarfähre *Helio* war das erste grosse solare Fahrgastschiff, das auf dem Bodensee zum Einsatz gekommen ist. Das Projekt hat gezeigt, dass Solarschiffe als Fähre eingesetzt werden können.

In einem zweiten Projekt mit dem Namen **SAM** [10] (Super-Accumulator-Module) erarbeitet die Fachhochschule-Zentralschweiz eine Kombination von Superkapazitäten, Batterien und der dazugehörigen Elektronik. Den zentralen und neuen Teil stellen die SCAP dar. Die Beschaltungselektronik der SCAP und deren Weiterentwicklung, ein Kerngebiet der Fachhochschule-Zentralschweiz, ist der Schwerpunkt des Projekts. Die Resultate sollen anhand eines Kickboards demonstriert werden. Die Vorbereitung des Kickboards mit einem von Batterien gespeisten Antrieb, ist der erste Teil dieses Projektes, welches grösstenteils von Privatunternehmen finanziert worden ist. Die Weiterentwicklung der Beschaltungselektronik leistet einen wichtigen Beitrag für alle Anwendungen mit Superkapazitäten.

Wie können Jugendliche für ökologische Anliegen im Verkehr gewonnen werden? Wie kann gezeigt werden, dass intelligente Mobilität nicht Verzicht heissen muss, sondern Spass machen kann? Das Projekt **Legair** [14] macht es vor: Mit Hilfe des BFE und weiteren Sponsoren wurde von Schülerinnen des Gymnasiums Köniz und ihrem Wirtschaftslehrer eine eigene Firma gegründet und elektrisch betriebene Fahrzeuge

angeschafft. Die Energie für die Fahrzeuge wird von Solarpanels auf dem Dach des Gymnasiums Köniz geliefert. Ein Marketingkonzept wird im Unterricht entwickelt und gemeinsam mit der Abteilung Grafik der Schule für Gestaltung umgesetzt. Die Elektrofahrzeuge werden an zahlreichen Anlässen vorgeführt und an interessierte Personen vermietet. Einige Fahrzeuge gelangen so in den gratis Veloverleih *Bern und Biel rollt*. Im Zusammenhang mit dem Jugendsolarprojekt von Greenpeace wurde in Bern im Jahr 2000 die erste Solartankstelle für Elektrofahrzeuge eröffnet. Die Energiefachstelle der Gemeinde Köniz wurde als Abnehmer eines Solarpanels und eines Elektrobikes (SolaRad) gewonnen und im November erhielt **Legair** den ersten Preis der Energiewirtschaft, den *prix eta+*, über CHF 10'000. Die zahlreichen Aktivitäten lösten ein grosses Medienecho aus. Mit einem Teil des Preisgeldes und der Hilfe des BFE können im Jahr 2001 weitere Fahrzeuge angeschafft werden. Neue Schülerinnen übernehmen das Projekt und führen es fort, eröffnen eine neue Solartankstelle beim Schwimmbad in Köniz, vermieten Fahrzeuge, und propagieren damit intelligente Mobilität.

Unterstützt durch das BFE entwickelt die **MES DEA** in Stabio TI eine **ZEBRA-Batterie Z 18** [5b] für die Telekommunikation. Der Modultest bestätigt die Eignung der **ZEBRA**-Zelle für den stationären Betrieb. Der Test mit einer Laufzeit von bisher 500 Tagen bestätigt die Floatspannung von 2,616 V. Bisher ist keine Degradation feststellbar. Die Gegenprobe bei 2,7 V zeigt einen Anstieg des Innenwiderstandes, d.h. diese Spannung ist zu hoch. Der erstmals für die Temperaturregelung eingesetzte Bimetallschalter hat sich als funktionierende und kostengünstige Lösung bestätigt. Alle Batteriedaten entsprechen den geplanten Werten. Eine Integration in den ascom Betrieb konnte aber nicht realisiert werden, weil ascom sich wegen des Abschwunges in der Telekom-Industrie aus dem Projekt zurückgezogen hat. Andere Erprobungsfelder werden zur Zeit gesucht. Die Untersuchung für den Einsatz mit Photovoltaik-Modulen hat zu einem Konzept für ein Solar Home System geführt, das Gegenstand eines anderen Projektantrages geworden ist.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Für die Forschung war das Berichtsjahr ein Zwischenjahr, – in dem keine grossen Forschungs-

vorhaben abgeschlossen wurden. Auf der Umsetzungsebene stachen aber der fotogene **SAM**

und das ebenso schöne *Intellibike* ins Auge. Beide Gefährte demonstrierten sehr medienwirksamen die Möglichkeiten einer energieeffizienten Mobilität. Als herausragendes Ergebnis ist aber insbesondere der erfolgreiche Abschluss des Grossversuches in Mendrisio zu bewerten. Trotz teilweise ruppigem medialem und politischem Gegenwind wurden die angestrebten Ziele erreicht und – noch wichtiger – das Projekt in das kantonale Nachfolgeprogramm *VELdue* überführt. Im Frühjahr 2001 stimmte der Tessiner grosse Rat über dieses Projekt, das die Förderung energieeffizienter Fahrzeuge zum Ziel hat, ab und hiess es mit einer sehr deutlichen Mehrheit gut. Auf der Negativseite waren die grossen

wirtschaftlichen Probleme von Schweizer Elektrofahrzeugproduzenten zu verzeichnen. Diese waren einerseits durch die konjunkturelle Situation und auf der andern Seite durch teilweise unternehmerische Fehlleistungen bedingt. Es sei hier aber darauf hingewiesen, dass die Projekte dieser Firmen seit mehreren Jahren keine BFE-Unterstützung mehr erhielten.

Im Jahr 2002 ist der Abschluss des *Bresa*- und des *Zebra*-Projektes von besonderem Interesse. Chancenreich ist auch die Ausweitung des *NewRide*-Projektes auf weitere Kantone und die Stadt Zürich.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

Unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden:

- [1] U. Seewer (Ulrich.Seewer@are.admin.ch), ARE, Bern, **Das Verkehrsverhalten der Schweizer - Microzensus Verkehr 2000** (SB)
- [2] L. Guzzella (guzzella@imrt.mavt.ethz.ch), ETH-Zürich, **a) Ablendlichtstudie** (SB) • **b) PALOS II, Optimale Antriebssysteme für Leichtfahrzeuge** (JB), www.ethz.ch
- [3] M. Horlacher (info@horlacher.com), Horlacher AG, Möhlin, **Modultec II – Modultechnologie für Leichtmobile**, (JB) www.horlacher.com
- [4] P. Dietrich (philipp.dietrich@psi.ch), PSI Villigen **BRESA – familientauglicher PW mit Brennstoffzelle** (JB) www.psi.ch
- [5] C. Dustmann (cdustmann@mes.ch), MES-DEA, Stabio, **a) Zebra Batterie**, (JB) • **b) Zebra Z18**, (JB) www.cebi.com
- [6] U. Schwegler (ursschwegler@bluewin.ch), Fischingen/Autorenkollektiv: **Synthesebericht Leicht-Elektromobilen in Mendrisio und Partnergemeinden** (SB) ENET 210194, (CD-ROM) ENET 210114, www.infovel.ch

Liste der P+D-Projekte

- [7] J.-M. Germanier (deandreaa@post.ch), LA POSTE, Sion, **CityCar Martigny** (SB)
- [8] D. Ryhiner CREE (info@cree.ch), Biel, **SAM** (SB) www.cree.ch
- [9] A. Vezzini (andrea.vezzini@hta-bi.bfh.ch), HTA-Biel, **Intellibike** (JB), <http://atari.hta-bi.bfh.ch:8080>
- [10] 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/berichte/bfe_99.pdf
- [11] Eberli, Sytrel, Colombier, **Mobitec** (JB)
- [12] K. Meier-Engel HTA-Biel (Karl.Meier@hta-bi.bfh.ch), **VEBILA - BALADUM** (JB)

- [13] P. Rohrer, Verein Bodensee, *Steckborn, Solarfähre Helio* (JB)
- [14] P. Sägesser, BUSINESSCLASS, *Köniz, Legair, Elektromobile in der Schulung* (SB)
<http://www.businessclass.ch>

Referenzen

- [15] M. Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch) **Programme Verkehr und Akkumulatoren/ Supercaps 2000 – 2003** www.energie-schweiz.ch/bfe/de/verkehr/forschung

ELEKTRIZITÄT

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2001

Roland Brüniger

roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch



Niederspannungsmotor bei der Lonza AG in Visp

Die Lonza bezieht etwa 1% des schweizerischen Elektrizitätsverbrauchs. Davon gehen über 90% in den Betrieb von Motoren. Analysen zeigen, dass dabei ein Einsparpotential von 45 – 50 GWh/Jahr besteht, was in etwa dem jährlichen Stromverbrauch aller Haushalte der Stadt Neuenburg entspricht.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die **Elektrizität** trägt etwa 20% zum Gesamtenergieverbrauch der Schweiz bei. Sie spielt aber auch für die effiziente Nutzung der anderen Energieträger eine wichtige Rolle. Mit dem Programm Elektrizität soll der Einsatz der Elektrizität von der Erzeugung bis zur Verwendung optimiert werden, wobei das Schwergewicht in der Förderung einer effizienten und rationellen Elektrizitätsnutzung liegt.

Das Programm Elektrizität konzentriert sich auf die **vier Schwerpunkte** *Energie- und Informationstechnik, elektrische Antriebe und Motoren, elektrische Verteilung sowie Hochtemperatursupraleitung* [17].

Obwohl aufgrund der bevorstehenden Marktliberalisierung keine einfache Aufgabe, wurde als Zielsetzung im Bereich **elektrische Verteilung** für 2001 festgelegt, unter Einbezug der Elektrizitätswirtschaft und kompetenten Fachhochschulen tragfähige Projekte zu initiieren. Fachlich steht dabei die Bearbeitung der vielfältigen, technischen Auswirkungen auf das Verteilnetz durch das Wachstum bei dezentralen Erzeugungsanlagen im Vordergrund. Damit sollen die technischen Voraussetzungen im Netz geschaffen werden, eine substantielle Zunahme von dezentralen Erzeugungsanlagen bewältigen zu können. Eine weitere Zielsetzung lag darin, gemeinsam mit der Elektrizitätsbranche die Erkenntnisse von vergangenen und laufenden Forschungsprojekten institutionalisiert umzusetzen.

Im technologieorientierten Schwerpunkt **Hochtemperatursupraleitung (HTSL) in der Energietechnik** liegt das Hauptaugenmerk darin, einerseits die Informationsverteilung innerhalb der Schweiz über die nationalen und internationalen Aktivitäten sicherzustellen und andererseits in massvollem Umfang systemorientierte Studien

durchzuführen. Die Zielsetzung für 2001 lag darin, ein gemeinsames Projekt mit der schweizerischen Industrie über den Einsatz von HTSL-Komponenten im Netz zu starten.

Die rasante Weiterentwicklung und Verbreitung der **Informations- und Kommunikationstechnik** macht dieses Gebiet zu einem bedeutenden Schwerpunkt. Durch die internationale Ausrichtung der vertreibenden Industrie ist ein enger Kontakt und Informationsaustausch mit internationalen Gremien unabdingbar. Die Zielsetzung in diesem Bereich bestand darin, sowohl durch die Pflege und Vertiefung von internationalen Kontakten als auch durch das konkrete Aufzeigen von Effizienzsteigerungsmöglichkeiten den elektrischen Verbrauch zukünftiger und bestehender Geräte sowohl im On-Mode als auch im Standby-Mode zu senken. Damit soll auch ein konkreter Beitrag zur Zielsetzung von EnergieSchweiz geleistet werden.

Ein messbarer Beitrag zur Zielsetzung von EnergieSchweiz soll mit dem Schwerpunkt **Antriebe/Motoren** erbracht werden. Elektrische Antriebe sind für einen Anteil von gegen 45% des Gesamtelektrizitätsverbrauchs verantwortlich. Das grösste Einsparpotential birgt dabei die Optimierung der jeweiligen Antriebssysteme. Die Zielsetzung für 2001 in diesem Bereich lag deshalb darin, in verschiedenen Industriebranchen Pilot- und Forschungsprojekte auszulösen, in denen nicht nur der Motor für sich, sondern das gesamte Antriebssystem auf Einsparpotentiale untersucht und diese auch umgesetzt werden. Ergänzend sollen mit Forschungsprojekten neuartige, effiziente Antriebssysteme untersucht werden. Ebenfalls sollen die internationalen Forschungs- und Deklarationsaktivitäten bei den nationalen Aktivitäten berücksichtigt werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

ELEKTRISCHE VERTEILUNG

In der Elektrizitätsbranche ist das Thema der Marktliberalisierung und insbesondere die bevorstehende Abstimmung über das Elektrizitätsmarktgesetz immer noch das vorherrschende Thema. Da der Abstimmungsausgang alles andere als gewiss ist, wird durch die Branche vorerst eine abwartende Haltung eingenommen, was

sich leider negativ auf das Interesse an langfristig orientierten Forschungsvorhaben ausdrückt.

Dies zeigt sich unter anderem auch daran, dass die Neuausrichtung des Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL) weiterhin im Fluss ist und noch nicht als abgeschlossen betrachtet werden kann. Es bleibt zu hoffen, dass der PSEL auch zukünftig bestehen bleibt.

In der gemeinsam vom BFE und der European Commission for the Regulation of Electricity and Gas (CREG) finanzierten **Studie über die Methoden der Tarifierung grenzüberschreitender Elektrizitätsübertragung** [1] wurden verschiedene Methoden untersucht, um eine nicht diskriminierende, verursachergerechte und auf den physikalischen Energieflüssen basierende Tarifierung sicherzustellen. Dazu wurden Simulationsrechnungen durchgeführt, wobei als Grundlage für die Verifizierung und insbesondere auch zur Illustration des Effekts verschiedener Parameter ein Messsatz aus dem europäischen Verbundnetz diente. Die nun entwickelte Methode zeigt die verschiedenen Möglichkeiten des Einsatzes eines Energiefluss-basierten Tarifkonzepts auf. Dieses kann den Bedürfnissen von Regulatoren, Netzoperatoren und Netzbetreibern angepasst und entsprechend genutzt werden.

Die Zielsetzung des Forschungsprojekts **Zunahme der dezentralen Energieerzeugungsanlagen in Verteilnetzen** [2] umfasst die Ermittlung der besonderen Gegebenheiten für den Betrieb und den Ausbau von Verteilnetzen bei zunehmend dezentraler Energieerzeugung und sich daraus ergebende konzeptionelle Massnahmen zu deren Beherrschung. Dabei wird die Betriebsführung von Netzen sowohl im Normal- als auch im Störfall untersucht. Konzeptionelle Anpassungen von Rundsteueranlagen, von Schutzsystemen, von Netzkonfigurationen, usw. bilden ebenfalls einen wesentlichen Bestandteil der Projektarbeiten. Nach einer relativ umfangreichen Vorbereitungszeit, während der drei unterschiedliche Netzbetreiber und der PSEL zur Unterstützung sowie eine Fachhochschule Biel zur Mitarbeit gewonnen werden konnten, wurden die Arbeiten Ende 2001 aufgenommen.

HOCHTEMPERATURSUPRALEITUNG (HTSL)

Nachdem mit der Systemstudie **Hochtemperatursupraleitung im Netz** [11] wesentliche Grundlagen für weitere Forschungsarbeiten im HTSL-Gebiet geschaffen wurden, galt es, gemeinsam mit der Industrie Projekte zu initiieren. Trotz verschiedenster Kontakte konnte – unter anderem auch aufgrund der momentan schwierigen Wirtschaftslage – bis anhin noch kein Projekt gestartet werden. Die Industrie ist zwar interessiert, nimmt im Moment aber eher eine Beobachterposition ein. Die Entwicklung des Strombegrenzers (Fig. 1), welcher als erfolgversprechendes Element im Netz gilt, ist in der Schweiz bereits weit fortgeschritten. Eine erste

Projektskizze für die Fortführung dieser Aktivitäten liegt vor, und es ist zu hoffen, dass 2002 mit den Projektarbeiten begonnen werden kann.



Figur 1: Prototyp-Strombegrenzer in einem schweizerischen Kraftwerk (Quelle: ABB Forschungszentrum)

Im Juli 2001 wurde vom Schweizerischen Nationalfonds eine neue Initiative mit zehn sogenannten *National Centers of Competence in Research* gestartet. Eines dieser Zentren befasst sich mit dem Studium und der Entwicklung von Materialien (Materials with Novel Electronic Properties, MANEP). Dieses Projekt umfasst 17 Forschungsgruppen aus verschiedenen Institutionen, wovon 8 theoretisch oder experimentell auch am Thema HTSL arbeiten.

Mit der Teilnahme am *Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector* [3] der Internationalen Energie Agentur (IEA) kann ein extensiver Informationsaustausch über die bisher erreichten Fortschritte, über den gegenwärtigen technischen Stand und die zukünftig vorgesehenen internationalen Arbeiten im HTSL-Gebiet sichergestellt werden. Das Programm ermöglicht den 14 Mitgliedstaaten, gegenseitig technische Berichte auszutauschen und Laboratorien und Testeinrichtungen sowie industrielle Unternehmen zu besuchen. Es veröffentlicht periodisch technisch hochstehende Berichte. Im Jahr 2001 wurde der Bericht *Today's Exploration Bearing upon the Private Sector's Future Use of Magnets incorporating High Temperature Superconductors* publiziert. Ein zusammenfassender Bericht über die internationale Zusammenarbeit wurde im SEV/VSE-Bulletin veröffentlicht [12].

VERWENDUNG / RATIONELLE NUTZUNG

Energie- und Informationstechnik

Der Anteil der Informations- und Kommunikationstechnik am Stromverbrauch in der Schweiz

liegt heute bei etwa 10% und die Zuwachsraten sind die höchsten von allen Stromanwendungen. Weltweit werden viele Studien für einen rationelleren Elektrizitätseinsatz insbesondere bei Büro- und Unterhaltungselektronikgeräten durchgeführt und Massnahmen ergriffen, um diese Einsparpotentiale auch durchzusetzen. Der Wissensstand und die Produkte verändern sich aber sehr schnell, der Markt ist global und die Akteure vielfältig. Eine internationale Zusammenarbeit erlaubt nicht nur, Doppelspurigkeiten zu vermeiden und Synergien zu nutzen, sie ist auch unumgänglich, um in diesem Marktsegment wirkungsvoll Einfluss zu nehmen.

Das **Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik** [4a] leistet einen Beitrag zu einem rationelleren Energieeinsatz bei Informationstechnik/Unterhaltungselektronik. Dazu werden in erster Linie die relevanten Informationen im In- und Ausland gesammelt, aufbereitet und verbreitet. Daneben werden umsetzungsorientierte Forschungsthemen analysiert und Forschungsprojekte evaluiert, konzipiert und teilweise selbst durchgeführt. Der Energiebedarf rund um das Internet war 2001 ein zentrales Thema. Die internationale Diskussion wurde insbesondere durch Beiträge zum Stromverbrauch im Haushalt infolge Vernetzung der Geräte aktiv mitbestimmt.

Ein zweiter Schwerpunkt betraf die Thematisierung der Energie in der Aus- und Weiterbildung von Informatikern, einerseits mittels Vorträgen an einer Fachtagung von Netzwerkspezialisten und an der Zürcher Hochschule Winterthur und andererseits durch die Mitarbeit bei der Erarbeitung eines Ausbildungskonzepts für Informatikerberufe. Das Ziel des Projekts **Energieaspekte in der IT-Ausbildung** [4b] liegt darin, die Thematik der Energieeffizienz von Geräten und Systemen der Informations- und Kommunikationstechnologien durch Sensibilisierung zu fördern. Dazu wurde eine enge Zusammenarbeit mit I-CH aufgebaut. Die I-CH ist eine schweizerische Dienstleistungsorganisation, welche in enger Absprache mit dem Bundesamt für Berufsbildung und Technologie (BBT) die Gestaltung und Koordination einer flexiblen, zukunftsorientierten Informatik-Ausbildung unterstützt. Es wurde ein Pilotmodul ausgewählt, in welchem nun nächstes Jahr eine Pilotausbildung durchgeführt wird.

Die Energieverluste der Stromversorgungsgeräte (Netzgerät, Power Supply, siehe Fig. 2) in der Informations- und Kommunikationstechnik haben einen bedeutenden Anteil an den Gesamt-

verlusten. Der Wirkungsgrad liegt typischerweise bei 60-70%, variiert aber stark mit der Auslastung der Geräte (Betriebspunkt, an dem die Power Supplies betrieben werden) und kann z.B. beim redundanten Betrieb bis auf 20% absinken. Von den Herstellern sind diesbezüglich keine Angaben (Deklarationen) erhältlich. Mit dem Projekt **Energy Efficiency in Computer Power Supplies** [4c] sollen bessere Kenntnisse über diese Verluste in einzelnen Geräten und in Gruppen von Geräten (wie sie z.B. in Data Centers eingesetzt werden) erarbeitet werden. An der ETH Zürich wurde 2001 ein Testsystem für die Bestimmung des Wirkungsgrades aufgebaut. Die Messungen beginnen 2002.



Figur 2: Netzteil eines PC mit 250 W Nominalleistung (Quelle, Encontrol GmbH)

EDV-Server sind rund um die Uhr in Betrieb. Und dies, obwohl in der Nacht und am Wochenende in vielen Fällen gar keine Nutzung der Serverdienstleistungen erfolgt. Eine repräsentative Marktuntersuchung im Jahr 2000 zeigte auf, dass in typischen Klein- und Mittelbetrieben (KMU-Betriebe) in der Deutschschweiz das automatische Ausschalten von Servern während bestimmten Zeiten begrüsst würde, falls entsprechende ausgereifte und zuverlässige Systeme dafür existierten. In vier Pilotanlagen wurden die technische und organisatorische Machbarkeit des Schaltens von Servern gezeigt. Leider befinden sich aber die in den Pilotsystemen eingesetzten Komponenten noch im Prototypen-Stadium, und für eine Kommerzialisierung der Systeme müssten noch beträchtliche Mittel investiert werden. Trotz verschiedener Gespräche und interessierter Unternehmen konnte bis anhin noch niemand gefunden werden, der eine professionelle Kommerzialisierung vorantreibt. Im Ende 2001 gestarteten Projekt **Stromeffizienzpotential bei Servern** [5] werden nun Daten

über ein mögliches Stromsparpotenzial durch Serverschalten erhoben. Weiter wird die Frage geklärt, mit welchen Massnahmen und Akteuren dieses Potenzial erschlossen werden kann.

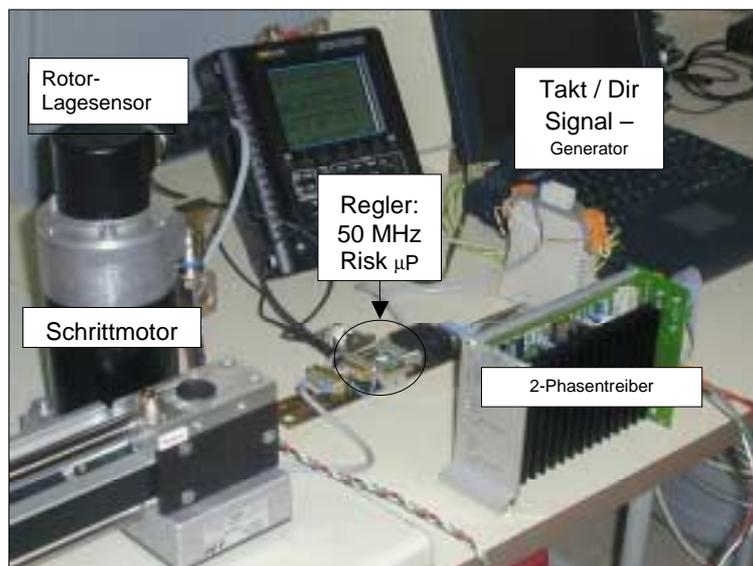
Antriebe / elektrische Motoren

Die *European Commission* (DG Transport and Energy) beabsichtigt die Durchführung eines *Motor Driven Systems Challenge* Programms, um verfügbare Erkenntnisse der Energieeffizienzsteigerung im Bereich Motoren/elektrische Antriebe in grossem Massstab in der Industrie umzusetzen. Um dieses Programm effizient anzugehen, wurde ein zweijähriges Pilotprojekt initiiert, mit dem verschiedene Aspekte auf Tauglichkeit und Umsetzbarkeit geprüft werden. Die Schweiz engagiert sich aktiv an diesem internationalen **Pilotprojekt: Motor Driven Systems Challenge Programm** [6a], womit in Kooperation mit einer grossen Anzahl Länder die Umsetzung verfügbarer Erkenntnisse angegangen werden kann. Die technischen Zielbereiche des Projekts sind Druckluft-Anlagen, Ventilatoren, und – bereichsübergreifend – Antriebe und Steuerungen. Nachdem jedes Teilnehmerland Ergebnisse von nationalen Forschungsprojekten und Programmen zusammenzustellen sowie die laufenden nationalen Programme und Aktivitäten aufzulisten hatte, wird zur Zeit ein Stichwort-Raster

zur gezielten Informationssuche in Englisch und in den Landessprachen erstellt. Ebenfalls liegen bereits Entwürfe zu entsprechenden Modul-Dokumenten sowie zu der Motor Challenge-Richtlinie und Förderer-Richtlinie (Endorser Guideline) vor (Fig. 3). Diese werden z.Z. überarbeitet und in einen verbindlichen Dokument-Raster eingepasst. In der Schweiz werden Unternehmen mit Interesse an einer Teilnahme gesucht.



Figur 3: Vorgesehenes Label im Motor Challenge Programme für energieeffiziente Industriebetriebe (Quelle: EU, Joint Research Center)



Figur 4: Versuchsaufbau des energiesparenden Schrittmotorenantriebs (Quelle: LEAG Antriebstechnik AG).

Schrittmotoren werden in grossen Stückzahlen bei der Automation eingesetzt. Der magnetische Kreis ist so gestaltet, dass der Motor im gesteuerten Betrieb definierte Lagen einnehmen kann, womit er mit geringem Steuerungsaufwand an-

getrieben werden kann. Wird ein solcher Schrittmotor beim Verfahren oder in einer Stillstandsposition mechanisch zu stark belastet, kann er *wegkippen*. Die Anlage muss in diesem Fehlerfall neu initialisiert werden, was zum Produktions-

ausfall führt. Zur Verminderung dieses Risikos wird der Motor jeweils maximal *bestromt*. Mit dem kürzlich gestarteten Projekt **Energiesparende Schrittmotorantriebe** [7] soll durch eine geeignete, lageabhängige Bestromung erreicht werden, dass der Motor nur den Strom aufnimmt, den er für eine entsprechende Kraft benötigt. Damit kann der Zykluswirkungsgrad drastisch erhöht werden. Anhand eines Prototyps (s. Fig. 4) soll die Wirtschaftlichkeit des *energiesparenden Schrittmotors* untersucht werden.

Zur Zeit laufen im Bereich Antriebe Vorbereitungsarbeiten für neue Projekte. Dazu gehört u.a. die Idee eines neuartigen Kompressors mit hohem Wirkungsgrad dank Einsatz eines Synchronmotors und die Veröffentlichung einer unabhängigen Testserie für Serverantriebe.

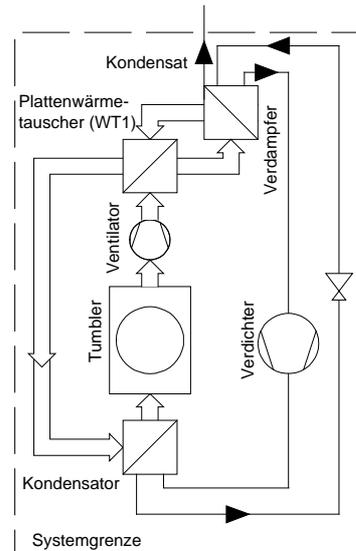
Diverses

Elektrische Heizbänder (Fig. 5) sind überraschend gewichtige Stromverbraucher: Es wird ein installierter Bestand von über 10'000 Kilometer mit einem jährlichen Stromverbrauch von ca. 270 GWh vermutet, was etwa dem Verbrauch aller Fernsehgeräte der Schweiz entspricht. Von besonderer Bedeutung scheint, dass ein beträchtlicher Anteil dieser Heizbänder unzuweckmässig, oder gar nicht gesteuert ist, oder dass nicht mehr bekannt ist, dass sie installiert sind. Somit bestehen grosse und wirtschaftlich zu realisierende Strom-Einsparpotenziale. Neben Frostschutz- und Aussenheizungen (für welche z.T. Verbote bestehen) sind Heizbänder auch als Rohrbegleitheizungen von Warmwasser-Verteilungen in der Industrie zu finden.



Figur 5: Aufbau eines elektrischen Heizbandes (Quelle: Raychem, J. Haag, HausTech 5/2001)

Im Forschungsprojekt **Elektrische Heizbänder** [6b] soll der Kenntnisstand bezüglich Anwendungen, Einsatzarten und Energiesparmöglichkeiten verbessert werden. In der Folge sind konkrete Umsetzungsprojekte für die Datenerhebung einerseits sowie Massnahmen (z.B. Informationskampagnen, Aus-/Weiterbildung) andererseits vorgesehen. Eine umfassende Informationsrunde bei den Projektpartnern erfolgte 2001.



Figur 6: Funktionsprinzip des Wärmepumpentumblers (Quelle: Zürcher Hochschule Winterthur)

Im Projekt **Wärmepumpentumbler für Mehrfamilienhäuser** [8] wurden zwei Prototypen von Wärmepumpen für die Luftentfeuchtung entwickelt (Prinzipschema gemäss Fig. 6) und ausgemessen. Der entwickelte Typ soll im Leistungsbereich einer Füllung von 6 kg Wäsche entsprechend nicht nur äusserst energieeffizient, sondern auch wesentlich rascher als vergleichbare Produkte die Wäsche trocknen. Basierend auf den Messungen und Konstruktion der Prototypen wurden Erkenntnisse bez. Konstruktion und technische Auslegung gewonnen. Parallel dazu konnte mit Miele ein grosses Unternehmen gewonnen werden, welches die diesbezüglichen Arbeiten weiter verfolgen wird und beabsichtigt, den neuen Wärmepumpentumbler zu kommerzialisieren. Nächstes Jahr ist die Produktion weiterer 8 Prototypen vorgesehen, die an ausgewählten Standorten in Mehrfamilienhäusern getestet werden. Die öffentliche Diskussion zum Thema *elektromagnetische Felder und deren Einfluss auf den menschlichen Körper* hat sich seit einiger Zeit von der Energietechnik in Richtung mobile Kommunikationssysteme verlagert. Dies drückt sich u.a. auch dadurch aus, dass sich die Aktivitäten im COST-Programm 244 **Biomedical effects on electromagnetic fields** [13] im COST-Programm 281 mit dem Titel **Potential health effects from emerging wireless communication systems** [14] fortsetzen. Die Schweiz nimmt auch beim neuen COST Programm 281 aktiv teil.

Nationale Zusammenarbeit

In allen definierten Programm-Schwerpunkten sind durch die BFE-Programmleitung seit längerem sogenannte Trendwatching-/Begleitgruppen etabliert worden, die sich aus Vertretern der Industrie, Fachhochschule, Hochschule und anderen Forschungsstätten zusammensetzen und sich regelmässig zum Informations- und Gedankenaustausch treffen. Diese Treffen sind sehr fruchtbar, was sich 2001 unter anderem durch eine teilweise markante **Ausweitung des interessierten Teilnehmerkreises** ausdrückte. Auch der Kontakt zu weiteren schweizerischen Geldgebern, insbesondere zum *Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft* (PSEL), zur *Commission recherche, développement, prospective de la Chambre romande d'énergie électrique* (RDP-CREE) und zum *Stromsparfonds des EWZ* sind sehr gut. Ebenfalls werden, soweit sich gemeinsame Interessensgebiete ergeben, die kantonalen Energieämter kontaktiert.

Mehrere Projekte erfolgen in enger Zusammenarbeit mit der ETH, und vermehrt werden auch die Fachhochschulen miteinbezogen. Zur Zeit laufen Projekte mit der Fachhochschule Wallis, Biel und Zürich/Winterthur. Zudem wird mit der Fachhochschule Yverdon der Aufbau eines **Kompetenzzentrums Druckluft** vorbereitet.

In mehreren Projekten und auch bei der mittel- und langfristigen Planung wird ein enger Kon-

takt mit den gegründeten **Energieagenturen** [15] gepflegt. So laufen bereits gemeinsame Projekte mit der Energieagentur der Wirtschaft (EnaW) und der Energieagentur Elektrogeräte (eae). Ebenso bestehen enge Kontakte mit der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz (S.A.F.E.).

In praktisch allen Projekten wird zudem angestrebt, die einschlägigen **Branchenverbände** einzubinden. So stützen sich z.B. im Projekt *Elektrische Heizbänder* die Arbeiten auf die Mitwirkung des *Schweiz. Spenglermeister- und Installateur-Verbands* (SSIV) und des *Verbands Schweizerischer Elektro-Installationsfirmen* (VSEI).

Im **Hochtemperatursupraleitungsbereich** schliesslich ist eine aktive Beteiligung an HTSL-Projekten im Hinblick auf Energieanwendungen vor allem bei ABB und den Kabelwerken Brugg im Gange. Zwei weitere Firmen arbeiten auf dem Gebiet der Supraleitung, aber nur für den Einsatz bei tiefen Temperaturen (Bruker Biospin für Hochfeldmagnete für NMR und Swissmetal Dornach für supraleitende Nb₃Sn-Drähte). Alle diese Firmen haben Zusammenarbeitsprogramme auf dem Gebiete der Supraleitung mit den schweizerischen Hochschulen, vor allem mit dem Paul Scherrer Institut, der ETH Zürich, der EPF Lausanne und der Universität Genf.

Internationale Zusammenarbeit

In allen Schwerpunktsbereichen wird ein reger internationaler Kontakt gepflegt, und neben dem gegenseitigen Informationsaustausch wird auch angestrebt, gemeinsame und/oder gegenseitig abgestimmte Projekte durchzuführen.

Mit der Teilnahme am IEA-Programm **Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector** werden die internationalen Aktivitäten auf diesem Gebiet beobachtet und Ergebnisse ausgetauscht. Neben der Teilnahme an diesem IEA-Programm nehmen im Rahmen des **5. EU-Rahmenprogramms** die Universität Genf und die ETH Lausanne am Projekt **BIG POWA** teil. Beide Gruppen bearbeiten das Problem der AC-Verluste. Ziel dieses Projekts ist es, einen kleinen Transformator und eine Modell-

spule bei 77 K mit runden Bi,Pb(2223) – Drähten und sehr kleinen AC-Verlusten zu bauen. Schliesslich ist die Schweiz mit zwei Gruppen Mitglied **des Superconducting European Network** (SCENET) vertreten. SCENET umfasst 73 verschiedene europäische Gruppen aus den Hochschulen und der Industrie und hat sich zur Aufgabe gemacht, den Informationsfluss innerhalb Europas zu optimieren.

Die Schweiz hat in den vergangenen Jahren im Bereich der *effizienten Energienutzung bei Informations- und Kommunikationstechnologien* weltweit eine massgebende Rolle gespielt und Einfluss auf die Ausgestaltung internationaler und globaler Energiedeklarationen und Labels genommen. Neben der Kontaktpflege zu diversen internationalen Agenturen und Forschungsorganisationen war vor allem die Einladung und

Teilnahme der Programmleitung an der 2-tägigen IEA-Konferenz in Tokyo [16] bedeutend. Diese dritte und letzte Workshop-Konferenz, welche die IEA unter dem Thema *Standby* organisierte, stand unter dem Motto **Towards a Harmonised Solution**. Das Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik leistet ebenfalls einen substantiellen Beitrag zur internationalen Vernetzung. Dort wurden u.a. die langjährigen Beziehungen mit dem LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) und der EPA (Environmental Protection Agency) in den USA, mit der SNEA (Swedish National Energy Administration) und mit der französischen ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) gepflegt. Zudem wurde eine Zusammenarbeit mit dem ISI der Fraunhofer Gesellschaft in Karlsruhe aufgebaut.

Im Bereich Motoren/Antriebe beteiligt sich die Schweiz am **SAVE-Projekt: Pilotproject for the Motor Challenge Programme**. Daneben

wird ein permanenter Kontakt mit der European Commission gepflegt. Dies hat u.a. auch dazu geführt, dass die Programmleitung als Mitglied des International Programme Committee der im Herbst 2002 stattfindenden **3rd international Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems** (EEMODS' 02) eingeladen wurde und Einsitz nehmen kann. Leider konnten keine Fortschritte bei den Verhandlungen mit der European Commission bezüglich der Motoren-Auslege-Software *OPAL* resp. die Verschmelzung mit dem europäischen Motoren-Tool *EURODEEM* erreicht werden. Die im Frühling 2001 bereits weit gediehenen Verhandlungen wurden ausgesetzt, nachdem die European Commission ein diesbezügliches SAVE-Projekt unter Einbezug der Schweiz lancieren wollte und die Anstrengungen in dieser Richtung forciert wurden. Leider wurde im Herbst das Projekt vom zuständigen Gremium nicht bewilligt. Es ist vorgesehen, die Angelegenheit 2002 nochmals neu anzugehen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die laufenden Projekte im P+D-Bereich konzentrieren sich zur Zeit ausschliesslich auf den Schwerpunkt *Antriebe/Motoren*.

Die Lonza AG in Visp gehört mit etwa 1% des schweizerischen Stromverbrauchs zu den grössten Stromverbrauchern der Schweiz. Etwa 94% des Stromverbrauchs dient dem Antrieb von Elektromotoren. Diese treiben vor allem Pumpen (siehe Fig. 7) und Kompressoren an. Das vermutlich beachtliche Einsparpotential wird im Projekt **Einsparpotential an elektr. Energie bei Motoren und Antrieben in der Lonza** [9] detailliert untersucht. Mit dem erarbeiteten Grundlagenmaterial soll einerseits die Sensibilität bezüglich des Energieverbrauchs wesentlich gesteigert werden. Andererseits werden aufgrund der Analysen-Ergebnisse konkrete, wirtschaftlich attraktive Massnahmen vorgeschlagen. Als technisches Einsparpotential wird erwartet, dass mit dem Einsatz von Drehzahl-geregelten Antrieben im Schnitt etwa 25% Elektrizitätseinsparungen erreicht werden können. Bei der Optimierung von Gesamtsystemen liegt das Einsparpotential je nach Bereich zwischen 25 – 80%. Aufgrund einer vorsichtigen Schätzung ist davon auszugehen, dass ein durchschnittliches, gemitteltetes Einsparpotential von etwa 10% besteht, was beachtlichen 45 – 50 GWh/Jahr entspricht.



Figur 7: HS-Netzwasserpumpe bei der Lonza (Quelle: Lonza AG, Visp)

In Druckluftanlagen stecken rentable Möglichkeiten zur Einsparung von Energie. Im Projekt **Druckluftoptimierung in einer Weberei** [10] wurde mit einer Lastgangmessung in einer Weberei festgestellt, dass der Kompressor Tag und Nacht zwischen 27 und 31 kW Leistung auf-

nimmt. Die systematische Suche nach den entsprechenden Druckluftverbrauchern führte zu einem Raum voller Lecks, welche 75% des Kompressorstromverbrauchs von rund 200 MWh/a verursachen. Im Websaal hört man bei abgeschalteten Maschinen aus zahlreichen Druckluftanschlüssen die Luft entweichen. Nach erfolgter Reparatur der undichten Druckluftanschlüsse wird mit einer weiteren Lastgangmessung der Erfolg überprüft. Dieses Beispiel zeigt, dass die Optimierung von Druckluftanlagen bei den Verbrauchern beginnt.

Für kleine und mittlere Gewerbebetriebe sind die durch Effizienzmassnahmen erzielten eingespar-

ten Stromkosten meist kleiner als die Kosten für die dazu notwendige Systemoptimierung durch externe Fachleute. Im Projekt **Druckluftoptimierung in einer Schreinerei** [10b] wird zur Realisierung der Energiesparmöglichkeiten im Druckluftbereich mit einfachen Beispielen eine praktische Anleitung ausgearbeitet. Im Projekt wurden verschiedene Massnahmen pro *Druckluftabnehmer* getestet und Aufwand/Ertrag pro Optimierungsschritt identifiziert. In der Anleitung werden schliesslich nur noch die wirklich erfolgreichen Massnahmen zur Druckluftoptimierung in Schreinereien beschrieben werden.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Die eidg. Energieforschungskommission hat das Programmkonzept für die Periode 2000 – 2003 im Januar 2001 geprüft und genehmigt, womit die inhaltlichen Rahmenbedingungen für diese Periode offiziell als bewilligt gelten.

Im Schwerpunkt **elektrische Verteilung** konnte das seit längerem vorgesehene Projekt bezüglich der Zunahme der dezentralen Erzeuger gegen Ende Jahr endlich starten. Die Arbeiten sollen 2002 intensiv angegangen werden. Mit Spannung wird auch die Abstimmung zum EMG erwartet, da deren Ausgang einen Einfluss auf die zukünftigen Aktivitäten der Elektrizitätswirtschaft haben wird. Die Bestrebungen für eine gemeinsame Ausbildungsplattform zwischen dem VSE und dem BFE sind weit gediehen.

Trotz intensiven Bemühungen und Besprechungen mit der Industrie konnte im Bereich der **Hochtemperatursupraleitung** (HTSL) nicht wie vorgesehen ein Projekt gestartet werden. Immerhin laufen weitere Gespräche, und möglicherweise wird 2002 auf dem Gebiet des Strombegrenzers das HTSL-Thema wieder aufgegriffen. Die Aktivitäten bezüglich HTSL-Informationsverbreitung hingegen laufen sehr gut.

Nach wie vor ist in der **Informations- und Kommunikationstechnik** kein Ende der rasanten Entwicklung absehbar. Es ist deshalb positiv, dass auf diesem Gebiet mehrere Forschungsvorhaben zur Eliminierung bestehender Wissenslücken gestartet werden konnten. Ferner war erfreulich, dass mit der Teilnahme am IEA-Kongress in Tokyo die Schweiz ihre neusten Forschungsergebnisse präsentieren konnte und

dabei auf reges Interesse stiess. Für 2002 ist eine weitere IEA-Konferenz in Paris vorgesehen, die sich mit dem Thema *Impact of Information and Communication Technology on Energy Systems* befasst. Der Programmleiter wird voraussichtlich an diesem Anlass die schweizerischen Aktivitäten und Ideen präsentieren können. Weitere Projekte sollen mögliche Einsparpotentiale aufzeigen. Die gestartete Studie über das Server-Einsparpotential soll Motivation für ein Engagement privater Unternehmen schaffen. Eine Fortführung der Aktivitäten zur *Vernetzung im Haushalt* sowie das Bearbeiten des Themas *Standby von Haushaltsgeräten* ist geplant.

Dank intensiven Vorarbeiten im Vorjahr konnten im Schwerpunkt **Antriebe/Motoren** mehrere Pilotprojekte gestartet werden. Insbesondere im Bereich Druckluft und Systemoptimierungen gelang es, mehrere Betriebe zur Durchführung energierelevanter Projekte zu motivieren. Für 2002 sind weitere Projekte in dieser Art geplant. Zudem soll weiter nach technischen Effizienzpotentialen geforscht werden. Dies war im Bereich von *getriebelosen Antrieben* bereits für 2001 in grösserem Ausmasse vorgesehen, konnte aber aufgrund terminlicher Probleme der Industriepartner nicht gestartet werden. Bedauerlich war, dass die Verschmelzung der beiden Auslegetools *OPAL* und *EURODEEM* nicht zustande kam. Zudem verzögerte sich auch der vorgesehene Aufbau eines Kompetenzzentrums Druckluft an der Fachhochschule Yverdon. Der rege internationale Kontakt wurde mit der Einladung der Programmleitung ins Programme Committee der EU-Motorentagung *EEMODS'02* belohnt.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

Unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden:

- [1] H. Glavitsch, G. Andersson, (haglav@bluewin.ch, andersson@eeh.ee.ethz.ch), ETH-ZÜRICH: ***A new Methodology for establishing a system for Cross-Border Transmission Tariffication in the Internal Electricity Market*** (SB) ENET 210004
- [2] G. Schnyder, (gilbert.schnyder@sing.ch), SCHNYDER INGENIEURE AG, Hünenberg: ***Zunahme der dezentralen Energieerzeugungsanlagen in Verteilnetzen*** (JB)
- [3] 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)
- [4] B. Aebischer, (bernard.aebischer@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, ETH-Zürich: ***a) Betreuung des Kompetenzzentrums Energie und Informationstechnik*** (JB) • ***b) Energieaspekte in der IT-Ausbildung*** (JB) • ***c) Energy Efficiency in Computer Power Supplies*** (JB)
- [5] A. Huser, (alois.huser@encontrol.ch), ENCONTROL GMBH, Niederrohrdorf: ***Stromeffizienzpotential bei Servern*** (JB)
- [6] J. Nipkow, (juergnipkow@swissonline.ch), ARENA ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIE-ALTERNATIVEN, Zürich: ***a) Schweizer Vertretung am SAVE-Programm: Pilot Actions for the Motor Challenge Programme*** (JB) • ***b) Elektrische Heizbänder***
- [7] S. Berchten, (bn@leag.com), LEAG ANTRIEBSTECHNIK AG, Schaffhausen: ***Energiesparender Schrittmotorenantrieb*** (JB)
- [8] E. Schwarzwald, THERMODUL CONSULTING, Curio: ***Wärmepumpentumbler für Mehrfamilienhaus*** (JB)

Liste der P+D-Projekte

- [9] S. Troger, G. Schnyder, V. Bregy, et al., (stefan.troger@lonzagroup.com) LONZA AG, Visp: ***Einsparpotential an elektrischer Energie bei Motoren und Antrieben in der Lonza*** (JB)
- [10] R. Gloor, (gloor@energie.ch), GLOOR ENGINEERING, Sufers: ***a) Druckluftoptimierung in einer Weberei*** (JB) • ***b) Druckluftoptimierung in einer Schreinerei*** (JB) www.energie.ch

Referenzen

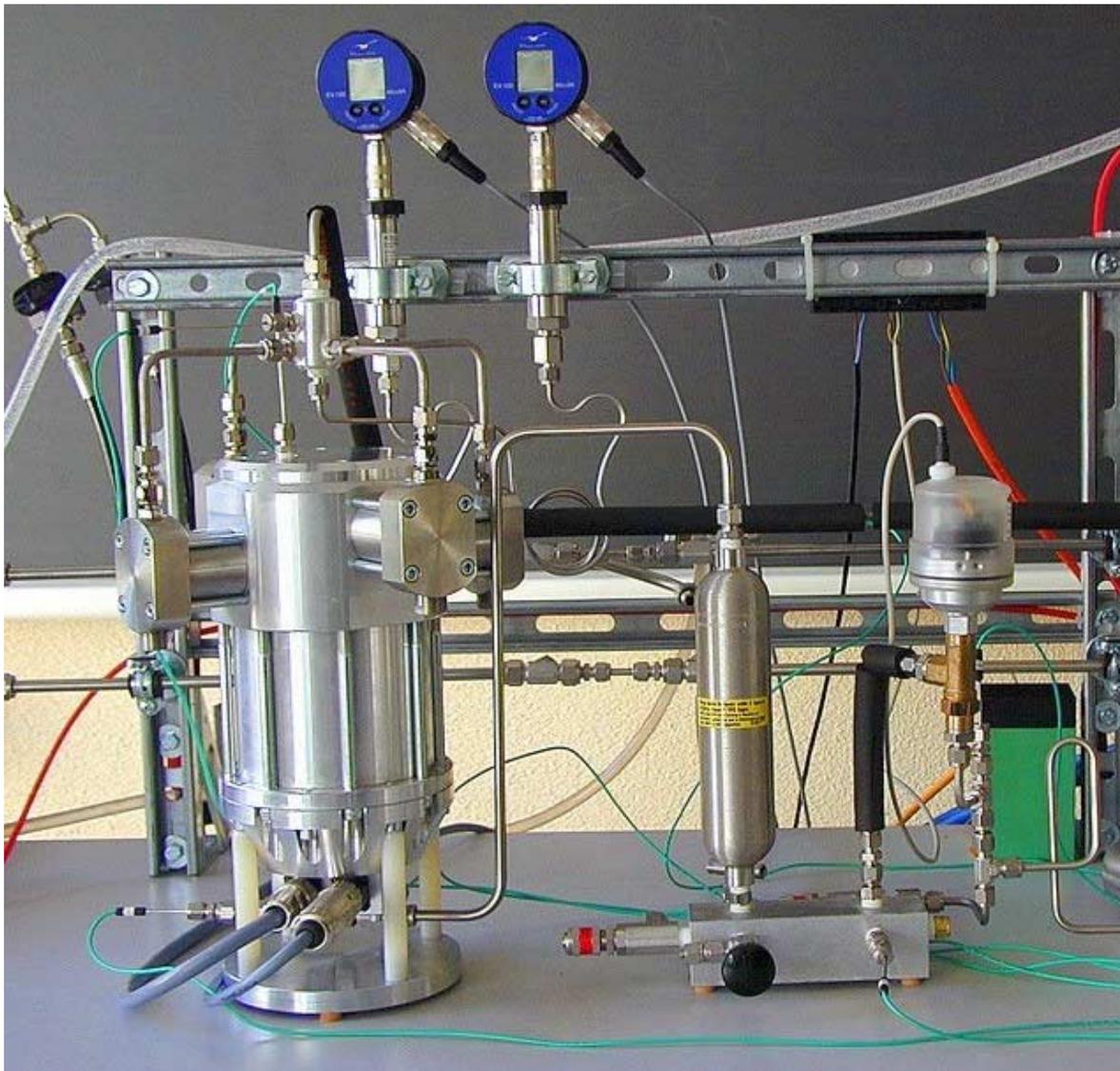
- [11] G. Schnyder, ABB Secheron, Genf: ***Hochtemperatursupraleitung im Netz*** BFE-Studie 2000, www.electricity-research.ch.
- [12] R. Flükiger, R. Brüniger: ***Die internationale Zusammenarbeit bei der Hochtemperatur-Supraleitung im Energiebereich***, aus SEVVSE-Bulletin, Heft 25/2001, Seiten 23 - 25, 2001.
- [13] Arne Wennberg: ***COST Actions 244BIS, 1996 – 2000, Biomedical effects of electromagnetic fields***, Final Report, ISBN 91-7045-592-9
- [14] ***Homepage des COST 281 Programms*** www.cost281.org
- [15] ***Homepage von Energieagenturen*** www.energieagentur.ch und www.energie-agentur.ch
- [16] R. Brüniger: ***Reisebericht: 3rd International Workshop: Standby-Power towards a harmonized solution, Tokyo 7./8. February 2001 in Tokyo***, www.electricity-research.ch.
- [17] ***Internetseite des Forschungsprogramms*** www.electricity-research.ch.

UMGEBUNGSWÄRME, ABWÄRME, WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2001

Martin Zogg

martin.zogg@bluewin.ch; www.waremepumpe.ch/fe



Kleinkompressor für Kohlendioxid

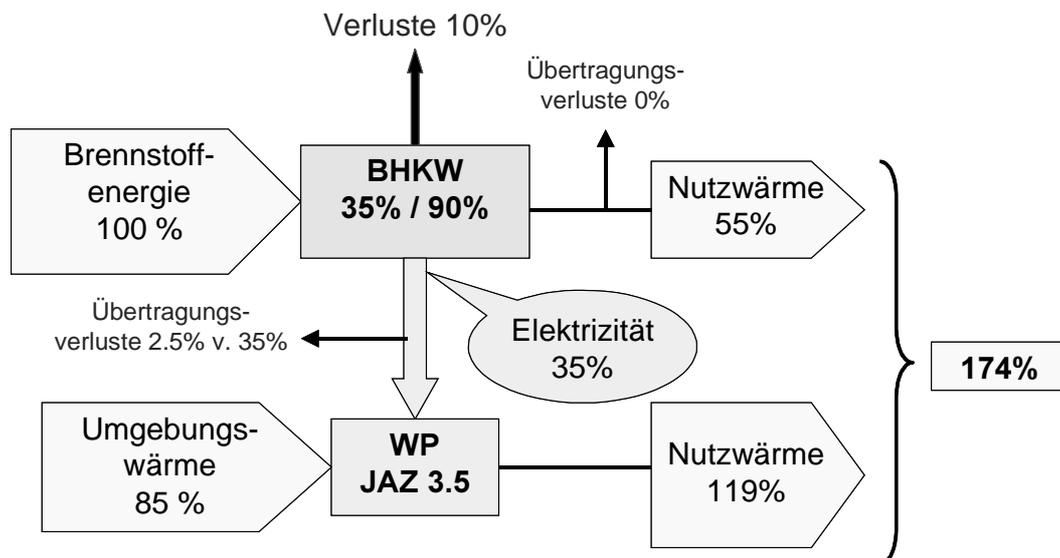
Versuchs-Kolbenkompressor (links im Bild) für Kohlendioxid auf dem Prüfstand. Der Kompressor ist die Schlüsselkomponente zur Entwicklung einer neuen Generation von Wärmepumpen mit natürlichem Arbeitsmittel zur Trinkwassererwärmung.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Erzeugung von Niedertemperaturwärme für die Raumheizung, die Warmwasserbereitung und für industrielle Prozesse benötigt über die Hälfte des gesamten schweizerischen Endenergiebedarfs. Dieses Forschungsprogramm will Wissens- und Erfahrungslücken schliessen, um in Zukunft einen wesentlich höheren Anteil der Niedertemperaturwärme aus Umgebungswärme (Luft, Erdboden, Grund- und Oberflächenwasser) oder aus Abwärme zu gewinnen. Durch die Kombination von Kompressionswärmepumpen mit Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit hohem elektrischem Wirkungsgrad oder modernen Kombikraftwerken lassen sich gegenüber den üblichen Öl- und Gasheizkesseln bereits heute **30% bis 50% an Brennstoffen einsparen** und damit die **CO₂-Emissionen entsprechend reduzieren** (Fig. 1) und dies zu konkurrenzfähigen Wärmepreisen, wie der von 33% im Jahr 1999 auf 38% im Jahr 2000 gestiegene Anteil an Wärmepumpenheizungen in neu gebauten Einfamilienhäusern eindrücklich belegt. In Zukunft sind noch deutlich höhere Einsparungen absehbar (Näheres dazu in [35]). Im wesentlich grösseren Markt für Heizungssanierungen liegt der Wärmepumpenanteil noch unter 3%. Für eine

deutliche Erhöhung sind noch bedeutende technische Weiterentwicklungen nötig. Die BFE-Energieforschung hat diese in den letzten Jahren forciert. Beachtliche Resultate liegen bereits vor ([33], [34]) und weitere Entwicklungsschritte werden folgen. Auch im Neubaubereich sind Verbesserung der Effizienz und der Betriebssicherheit sowie eine Reduktion der Kosten durchaus noch möglich. Im Jahr 2001 wurden deshalb in Umsetzung des Energieforschungskonzepts des Bundes [36] die folgenden Hauptziele verfolgt:

- **Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt:** Erarbeiten von Grundlagen zur Entwicklung effizienter Wärmepumpen für Temperaturhübe bis 75 K.
- **Systemoptimierung:** Entwickeln neuer Methoden für die Betriebsüberwachung, das Testen, das Optimieren und das Regeln von Wärmepumpenheizungssystemen; Erarbeiten von Standardschaltungen für kleine Wärmepumpenheizungssysteme bis 30 kW.
- Im Bereich **Abwärmennutzung:** Reduktion des Energiebedarfs komplexer chemischer Prozesse.



Figur 1: Kombination eines Blockheizkraftwerks (BHKW) mit einer Kompressionswärmepumpe (WP). Gesamtwirkungsgrad des BHKW: 90%, elektrischer Wirkungsgrad: 35%, Stromübertragungsverluste vom BHKW zur Wärmepumpe: 2.5%, Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe: 3.5.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

WÄRMEPUMPEN

Um einen echten Durchbruch der Wärmepumpe im Sanierungsmarkt zu erreichen, wurde das Hauptgewicht der Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen auf eine für den **Sanierungsmarkt** geeignete Wärmepumpe gelegt. Diese muss auch grosse Temperaturunterschiede zwischen der Wärmequelle und den Wärmebezüglern mit hoher Effizienz, geringem Wärmeleistungsabfall und begrenzter Überhitzung des Arbeitsmittels im Kompressor bewältigen. Zur Erfüllung des BFE-Pflichtenhefts für die Entwicklung einer **Swiss Retrofit Heat Pump (SRHP)** wurden deshalb weitere Forschungsarbeiten durchgeführt. Das im Rahmen einer Ausschreibung zur **SRHP** erstplazierte Funktionsmuster wurde im Januar/März 2001 in einem ursprünglich mit einem Ölkessel beheizten Haus aus den Fünfzigerjahren erprobt [3]. Diese Felderprobung zeigte noch einen erheblichen Verbesserungsbedarf bei der Einbindung ins konventionelle Wärmeverteilsystem mit Heizkörpern und beim unkonventionellen Teilsystem zur indirekten Wärmeentnahme aus der Umgebungsluft. Durch einen neuen Wärmeträger konnte der Pumpenergiebedarf in diesem unkonventionellen Teilsystem ohne Einbussen bei der geringen Temperaturdifferenz zwischen der Aussenluft und der Verdampfungstemperatur des Arbeitsmittels erheblich reduziert werden [7]. In der Heizsaison 2001/2002 werden weitere detaillierte Messungen in zwei bisher mit Ölkesseln beheizten Wohnhäusern (Zweifamilienhaus, Baujahr 1958 und Einfamilienhaus, Baujahr 1810) durchgeführt. Beide weisen bei einer Aussentemperatur von -12°C Vorlauftemperaturen um 60°C auf. In beiden Häusern übernimmt das Funktionsmuster der **SRHP** auch die Warmwasserbereitung. Die Einbindung der Funktionsmuster in die bestehenden Wärmeverteilsysteme mit Heizkörpern erfolgt mit Schaltungen nach [9]. Die detaillierten Feldversuche sollen zeigen, ob die vom BFE gestellten Anforderungen für eine **SRHP** auch im praktischen Betrieb erreicht werden [11].

In einem gemeinsamen Projekt mit *Electricité de France* wird eine anderer Variante einer **Retrofitwärmepumpe** mit Aussenluft als Wärmequelle entwickelt [17]. Auch diese beruht auf einer Economizerschaltung. Sie wurde aber mit einem speziell für das Zwischenansaugen von verdampftem Arbeitsmittel ausgelegten Proto-

typ-Scrollkompressor ausgerüstet. Unter Einschluss von Ventilator und Steuerung wurde damit ohne Abtauen eine Leistungszahl von 3.1 bei Luft 2°C / Wasser 50°C und von 2.02 bei -12°C / 65°C erreicht. Dies entspricht einem Gütegrad von je 0.460! Mit lange andauerndem Abtaubetrieb beträgt der gemessene Gütegrad bei 2°C / 50°C immer noch 0.407. Im praktischen Betrieb scheint damit der vom BFE geforderte Gütegrad von 0.425 durchaus erreichbar. Zur Vereinfachung wurde das elektronische Expansionsventil für den Economizerteilstrom erfolgreich durch eine Kapillare ersetzt. Für den effizienteren Einsatz von Wärmepumpen im Sanierungsmarkt ist zu hoffen, dass der untersuchte Prototypkompressor bald in Serie produziert wird.

Die thermodynamisch noch bessere Lösung wären echt **zweistufige Prozesse**. Hier treten aber Probleme mit der Schmierung der beiden Kompressoren auf. Dem Phänomen der **Verlagerung des Schmieröls** wird in [20] vertieft nachgegangen. Die bisher entwickelten Modellvorstellungen vermögen die beobachtete Tendenz einer laufenden Reduktion des Ölinhalts im Kompressor der zweiten Stufe und einer entsprechenden Anreicherung im Kompressor der ersten Stufe bereits wiederzugeben.

Bei grossen Kälteanlagen und Wärmepumpen ist Ammoniak als hervorragendes natürliches Arbeitsmittel längst Stand der Technik. Im Hinblick auf den oft diskutierten Ausstieg aus den Fluorkohlenwasserstoffen wurde deshalb die Machbarkeit einer **Ammoniak-Kleinwärmepumpe** für den Sanierungsmarkt untersucht [8]. Nach der Überwindung zahlreicher Schwierigkeiten und Enttäuschungen wurde ein neues Funktionsmuster gebaut und in Betrieb genommen (Fig. 3). An diesem sollen in einer nächsten Projektphase detaillierte Messungen vorgenommen werden. Dabei soll auch der Einfluss der für eine spätere Kommerzialisierung noch nötigen rigorosen Vereinfachungen ermittelt werden. Ein besonderes Problem ist die starke Erwärmung des Ammoniaks während der Verdichtung. Es wurde deshalb ein Vielzellenkompressor (Flügelzellenkompressor) als Alternative zu den sonst bei Kleinwärmepumpen üblichen Scroll- und Hubkolbenkompressoren eingesetzt. Beim Vielzellenkompressor wird das Arbeitsmittel während der Verdichtung durch den hohen Schmierölauf gekühlt. In einem weiteren Projekt [5] wurden

die Charakteristiken dieses auch für andere Anwendungen interessanten Kompressors ausgemessen und wertvolle Betriebserfahrungen gesammelt.



Figur 2: Versuchsanlage einer Ammoniakkleinwärmepumpe (aus [8]).

Falls die Wärmeabgabe über eine grössere Temperaturspreizung (z.B. Warmwasserbereitung, Trocknung) erfolgen kann, ist auch Kohlendioxid ein interessantes natürliches Kältemittel für Wärmepumpen. Schlüsselkomponente für entsprechende Wärmepumpen ist der Kompressor. Um die mit der hohen Löslichkeit von Schmieröl in überkritischem Kohlendioxid verbundenen Probleme zu umgehen, sollte der Kompressor möglichst ölfrei arbeiten. Als schweizerischer Beitrag zu einem Projekt im Rahmen der *Internationalen Energieagentur (IEA)* wurde deshalb ein ölfreier **Kleinkompressor für Kohlendioxid** entwickelt [1] (s. Titelbild). Die Neukonstruktion (4 Zylinder, Bohrung 10 mm, Hub 16 mm) wurde auf dem Prüfstand im Hinblick auf die Eignung für die Warmwasserbereitung getestet. Dabei wurde CO₂ von 35 bar auf überkritische 80 bis 150 bar und Temperaturen bis 190°C bei Drehzahlen von 750 bis 2900 Umdrehungen pro Minute und Leistungsaufnahmen von 150 bis 950 W verdichtet. Der gemessene isentrope Wirkungsgrad liegt trotz fehlender Schmierfilmdichtung zwischen Kolben und Zylinder im gleichen Bereich wie bei konventionellen Kompressoren. Dies ist ein beachtlicher Erfolg! Nach

einer entsprechenden Weiterentwicklung zur Seriereife ist zu hoffen, dass aus dem Funktionsmuster bald ein Seriekompressor wird und dass die Produktion in der Schweiz erfolgen kann.

In einer Potenzialstudie [2] wurde die Nutzung durchlässiger **Schotterschichten als Wärmequelle** für Wärmepumpen und zur Raumkühlung untersucht. Leider erwies sich diese bisher nicht verwendete Wärmequelle nur in seltenen Sonderfällen zur Beheizung von Einfamilienhäusern als energetisch sinnvoll. Das BFE-Programmmodul *EWS* für die vereinfachte Computersimulation des zeitlichen Verhaltens von **Erdwärmesonden** wird in einem gemeinsamen Projekt mit dem *PSEL* (Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft) durch einen Vergleich mit dem dreidimensionalen Simulationsprogramm *Fracture* der *ETHZ* und den Messergebnissen an einer Testanlage mit einer 265m tiefen Erdwärmesonde validiert [13]. Weiter soll die optimale Länge von Erdwärmesonden untersucht werden.

SYSTEMOPTIMIERUNG

Infolge der Abhängigkeit der Effizienz und der Wärmeleistung von Wärmepumpen vom Temperaturhub (Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Heizungskreislauf) setzen gute Wärmepumpenheizungssysteme eine besonders sorgfältige Auslegung, eine eingehende Betriebsoptimierung und eine gute Regelstrategie mit Einbezug der Wechselwirkungen zwischen Gebäude, Wärmeverteilungssystem, Wärmespeichersystem, Wärmepumpe und Wärmequelle voraus. Hier sind noch bedeutende Fortschritte möglich.

Das weit verbreitete **Auslegungsprogramm *WPCalc*** für grössere Wärmepumpenanlagen wurde durch den **Einbau des Berechnungsmoduls *EWS*** für Erdwärmesonden erweitert [21]. Das Programm *WPCalc* ermöglicht eine bessere Erfassung des Wärmeentzugs aus dem Erdreich sowie die Berücksichtigung von zwei Gesteinsschichten mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten. Es liefert nun auch eine grafische Darstellung der sich über ein ganzes Betriebsjahr einstellenden Erdwärmesonden-Austrittstemperatur. Für die bisherigen Benutzer des Programms ist im Jahr 2002 ein Gratis-Update über [35] vorgesehen. Für die Auslegungsprogramme *WPCalc* und ***WKKCalc*** für Blockheizkraftwerke wird eine gründliche Überarbeitung fällig. Dazu wurde basierend auf einer Benut-

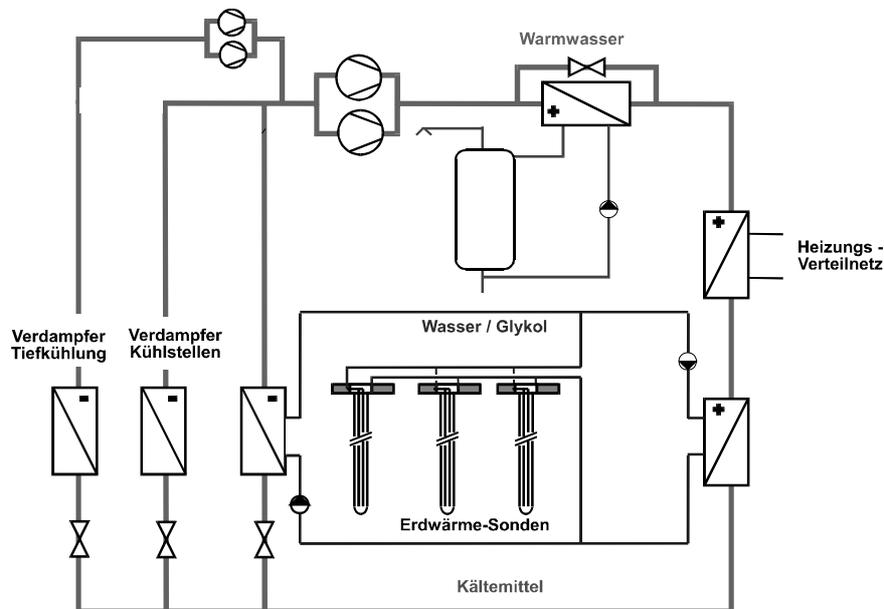
zerumfrage eine ausführliche Anforderungsliste mit einer umfassenden Dokumentation zusammengestellt [6].

Aus Kostengründen können Kleinwärmepumpenanlagen nicht mit Simulationsprogrammen dimensioniert werden. Deshalb sollen für Kleinwärmepumpenanlagen bis 30 kW Heizleistung **Standardschaltungen** ausgearbeitet werden [9], [29]. Für diese werden aufgrund von Computersimulationen einfache Dimensionierungstabellen und Vorschriften für die Steuerung erarbeitet. Dies soll mit geringem Planungsaufwand hohe Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpenheizungen ermöglichen. Die Standardschaltungen wurden unter Einbezug der schweizerischen Hersteller und Anbieter von Wärmepumpen ausgewählt. Es werden sowohl Neubauten (Vorlauftemperatur bis 45°C) wie auch Sanierungsobjekte (Vorlauftemperatur bis 60°C) und unterschiedliche Warmwasserbereitungsmethoden berücksichtigt. Auch die thermische Solarenergienutzung soll einbezogen werden.

Die Anpassung der von Wärmepumpen abgegebenen Wärme an den Heizwärmebedarf erfolgt in der Regel durch taktenden Betrieb. Dabei entstehen Verluste beim Wiederaufheizen aller Komponenten der Wärmepumpe auf Betriebstemperatur. Die dadurch verursachte Minderleistung ist ein in bisherigen Prüfungen nicht erfasstes Qualitätsmerkmal einer Wärmepumpe

und sollte auch bei der Auslegung von Wärmepumpenheizungen durch Computersimulationen erfasst werden können. Es wurde ein vollständiges Testprozedere für einen **dynamischen Wärmepumpentest** [4] entwickelt und an einer 10 kW-Wärmepumpe erprobt. Die Umsetzung in den praktischen Wärmepumpentest soll über [22] europaweit koordiniert werden.

Die Regelung von Wärmepumpen durch **Pulsbreitenmodulation** [10] beruht auf einer laufenden Bestimmung des Wärmebedarfs eines Gebäudes und einer zeitoptimalen Zufuhr dieses Wärmebedarfs durch die Wärmepumpe. Dieses Regelkonzept weist gegenüber der konventionellen aussentemperaturgeführten Rücklaufregelung erhebliche Vorteile auf (Näheres in [35]). Die Bestimmung des Wärmebedarfs kann im einfachsten Fall durch die Energiekennlinien eines Gebäudes erfolgen. Wesentliche Verbesserungen insbesondere bei Gebäuden mit geringer thermischer Trägheit und hohem Wärmegewinn durch Solarstrahlung sind durch physikalische Modelle zu erwarten. Diese erfassen die Einflüsse des Wärmeverteilsystems, des Gebäudes und des Wetters. In der zweiten Phase dieses Projekts werden entsprechende Regler durch Industriefirmen programmiert und in einem Einfamilienhaus während der Heizperioden 2000/01 und 2001/02 erprobt und mit der konventionellen witterungsgeführten Rücklauftemperaturregelung verglichen.



Figur 3: Vereinfachtes Fließbild einer von der Firma KWT (Belp) für ein Restaurant ausgeführten Anlage zur gekoppelten Kälte- und Wärmeproduktion mit direkter Verdampfung und kleinem Erdwärmesondenfeld (aus [12]).

Zur laufenden Ermittlung wesentlicher Parameter von Wärmepumpen und dem Erkennen allfälliger Fehlfunktionen während der Inbetriebnahme und im Betrieb wurden zwei neue **Fehlerdiagnosemethoden** entwickelt [14], [32]. Sie erleichtern die Betriebsoptimierung und geben Gewissheit über das optimale Funktionieren. Insbesondere erlauben sie aber die Auslösung eines Wartungseingriffs erst bei tatsächlichem Bedarf (zustandsorientierte Instandhaltung). Beide Methoden wurden in der fünften Projektphase an einer simulierten Wärmepumpe sowie anhand von Messungen an Wärmepumpen in einem Einfamilienhaus und auf zwei Prüfständen weiterentwickelt und erfolgreich erprobt. Die Methoden sind auch auf Kältemaschinen anwendbar. In einer nächsten Projektphase ist mit Beteiligung von Industriefirmen die Umsetzung in Wärmepumpensteuerungen vorgesehen.

In der geschickten Nutzung der Abwärme von Gewerbe- und Klimakälteanlagen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung (Fig. 3) liegt gegenüber der noch häufigen getrennten Kälteerzeugung mit Rückkühlung und der Wärmeerzeugung mit Öl- oder Gaskesseln ein erhebliches Energiesparpotenzial. Kälte- und Wärmebedarf stimmen im Allgemeinen allerdings weder tageszeitlich noch saisonal überein. Das im Projekt **gekoppelte Kälte- und Wärmeerzeugung mit Erdwärmesonden** [12] ausgearbeitete Planungshandbuch zeigt das Auslegen von Wasserspeichern zum Ausgleich der tageszeitlichen Bilanzungleichgewichte respektive von Erdwärmesonden (beziehungsweise von Erdwärmesondenfeldern) zum Auffangen der saisonalen Bilanzunterschiede anhand eines Praxisbeispiels.

BLOCKHEIZKRAFTWERKE (BHKW)

Niedrigtemperaturwärme kann durch die Kombination BHKW-Wärmepumpen gemäss Fig. 1 energieeffizient produziert werden. Für diese Kombination gibt es bereits einen erheblichen Überschuss der mit BHKW produzierten elektrischen Energie gegenüber der von den Wärmepumpen konsumierten. Die Weiterentwicklung der konventionellen BHKW-Technik mit fossilen Brennstoffen und Verbrennungsmotoren wurde entsprechend der BFE-Strategie [28] zurückgestellt. Für den in BFE-Forschungsprojekten entwickelten emissions-armen **SwissMotor** wird dagegen der Betrieb mit Biogas im Allgemeinen und mit Klärgas im Speziellen weiter verbessert. Ziel eines neuen Projekts [19] mit Unterstützung des Motoren- und des BHKW-Herstellers ist, mit

der Magermotorvariante des *SwissMotors* unter Einhaltung der schweizerischen Luftreinhalteverordnung einen mechanischen Wirkungsgrad von wenigstens 36% zu erreichen.

VERFAHRENSTECHNISCHE PROZESSE

Bei der rationellen Energienutzung in verfahrenstechnischen Prozessen konzentrierten sich die Forschungsbemühungen auf die in der Schweiz wichtigen Batch-Prozesse und die Lösungsmittelbewirtschaftung. Die systematische Konzeption der Abwärmenutzung bei **Batch-Prozessen** gehört zu den schwierigsten Aufgaben der Prozessintegration [31]. Während sich die Pinch-Methode für kontinuierliche Prozesse etabliert hat, kann sie auf Batch-Prozesse nur umständlich übertragen werden. Deshalb wurde ein neuer Lösungsansatz für die optimale Auslegung von Wärmeübertragungsnetzwerken mit **genetischen Algorithmen** verfolgt [18]. Dabei wurden Prozesse mit direkter Wärmeübertragung und Wärmezwischenspeicherung erfasst. Als Vorteile dieses Ansatzes erwies sich die für die Praxis wichtige Möglichkeit des Einbaus von Erfahrungsregeln – als Nachteile sind die hohe Rechenzeit und die Gefahr der Instabilität bei der Lösungsfindung zu erwähnen. Auch bei der Verwendung genetischer Algorithmen muss das Lösungsverfahren in mehrere Teilschritte aufgeteilt werden. Die entwickelte Software muss für die Anwendung durch Ingenieure in der Praxis noch weiterentwickelt werden. Energiesparende Massnahmen werden nur dort durchgeführt, wo sie auch Wesentliches bringen. Deshalb werden **Batch-Prozesse** in Zusammenarbeit mit der chemischen Industrie anhand repräsentativer Fallbeispiele eingehend analysiert [15]. Infolge eines Brandes im untersuchten Produktionsgebäude musste auf ein anders Gebäude ausgewichen werden. Das Projekt erfuhr dadurch empfindliche Verzögerungen.

Im Energiebedarf der chemischen Prozesstechnik spielen Lösungsmittel eine bedeutende Rolle. Nach einer detaillierten Analyse der Lösungsmittelbewirtschaftung in der chemisch-pharmazeutischen Industrie der Schweiz wurde mit dem ökologischen Vergleich zweier Optionen für **Abfalllösungsmittelbehandlung** begonnen [16]. Dabei wurden die Verbrennung eines Toluol-Methanol-Wasser-Gemisches in einer Sondermüllverbrennungsanlage und die Regeneration des Gemisches durch eine Rektifikation verglichen. Im untersuchten Fallbeispiel schnitt die Rektifikation günstiger ab als die Verbrennung.

Nationale Zusammenarbeit

Da an den meisten der ohnehin sehr anwendungsnahen Projektarbeiten private Firmen beteiligt sind, ist die direkte Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft sehr eng. Mit den in der Fachpresse und in der Internetseite des Forschungsprogramms [35] publizierten Kurzfassungen des Programmleiters sowie den vollständigen Schlussberichten wird laufend auf die Resultate abgeschlossener Projekte hingewiesen. Der Umsetzung der Forschungsergebnisse diene auch die sehr gut besuchte 8. UAW-Tagung vom Mai 2001 [33]. Sie vermittelte die Ergebnisse laufender und abgeschlossener Projekte im Forschungsschwerpunkt **Wärmepumpen für die Heizungssanierung** und gab Gelegenheit, das daraus entstandene Produkt einer zukunftsweisenden Retrofit-Wärmepumpe vorzustellen. In einem Seminar [30] wurden die Resultate früherer BFE-Forschungsprojekte zu Wärmepumpenheizungen für Niedrigenergie- und Passivhäuser mit Fachleuten aus der Praxis erörtert.

Die Zusammenarbeit mit dem **Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft** (PSEL) für eine thermodynamisch sinnvollere Erzeugung der Niedertemperaturwärme wurde durch zwei gemeinsame Projekte [13], [21] intensiviert. Der PSEL unterstützte mit der Axpo, mit dem BFE und mit dem **Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke** (VSE) die Qualitätssicherung von Wärmepumpen durch das Wärmepumpentestzentrum Töss. Dieses auch international anerkannte Prüfinstitut wird durch das **Elektrizitätswerk des Kantons Zürich** (EKZ)

betrieben. 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 wie auch des FEV im Bereich der Wärme-Kraft-Kopplung erleichterten eine Konzentration der beschränkten Mittel auf die Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnik. In der **Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz** (FWS) arbeiten das BFE, Branchenverbände von Planern und Installateuren, Hersteller und Anbieter von Wärmepumpen, Elektrizitätswerke und Dienststellen von Kantonen zur Verbreitung zuverlässiger, effizienter und preiswerter Wärmepumpenheizungsanlagen zusammen. Nach dem bewährten Gütesiegel für Wärmepumpen wurde im Herbst 2001 ein Gütesiegel für Bohrfirmen (für Erdwärmesonden) eingeführt. Zur Qualitätssicherung der ganzen Wärmepumpenheizungsanlage ist ein nationales Weiterbildungsmodul in Vorbereitung. Dank gemeinsamer Anstrengungen der erwähnten Institutionen wurden in der Schweiz im Jahr 2001 gegen 40% aller Neubauten mit Wärmepumpen ausgerüstet und total 7835 Wärmepumpen in Betrieb genommen. Die Anliegen der dezentralen Erzeugung elektrischer Energie in liberalisierten Märkten durch Wärme-Kraft-Kopplung werden durch den **WKK-Fachverband** wahrgenommen.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit erfolgte im Jahr 2001 vorwiegend durch **bilaterale Kooperation** mit Nachbarländern [17], die Mitwirkung in für die Wärmepumpentechnik wichtigen internationalen europäischen Normengremien [28] und durch die Mitarbeit in Projekten der Internationalen Energieagentur IEA. Zwischen der FWS und den entsprechenden Organisationen in Deutschland und Österreich finden regelmässige Dreiländertreffen statt. Die FWS ist assoziiertes Mitglied der **European Heat Pump Association** (EHPA). Im Rahmen der schweizerischen Beteiligung am **IEA Heat Pump Programme**

(HPP) wurde mit dem Projekt [1] ein bedeutender Beitrag zum IEA-Projekt *Selected Issues on CO₂ as a Working Fluid in Compression Systems* (Annex 27) geleistet. Im Berichtsjahr wurde durch die Schweiz ein neuer IEA-Projektvorschlag zum Testen von Wärmepumpen zur kombinierten Raumheizung und Warmwasserbereitung ausgearbeitet. 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).

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Fabrice Rognon, chef du programme P+D

fabrice.rognon@bfe.admin.ch

CHALEUR AMBIANTE (POMPES A CHALEUR)

L'embellie conjoncturelle du premier trimestre laissa vite la place à une stagnation générale. Des projets acceptés en 2000 et 2001, trois ont été annulés en raison de surcoûts trop importants, malgré une participation financière de l'OFEN. Les contacts informels pour une éventuelle subvention de la part de l'OFEN ont été très nombreux, mais le nombre de projets effectivement mis en œuvre demeure très faible: 3 projets déposés ont été acceptés. La pression sur les coûts par les systèmes classiques (chaudières) demeure très forte et le goût du risque et de l'innovation pour une installation même de démonstration sont très faibles. Par conséquent, 20% du budget 2001 n'a pas pu être utilisé. Les 35 projets en cours se répartissent en 23 installations et 12 mandats (Tableau 1).

Source de chaleur	Nombre
Air	6
Sondes géothermiques	4
Nappe phréatique	5
Eau de surface (rivière, lac)	1
Eau de STEP	4
Chauffage à distance	3
Total	23

Tableau 1: Répartition par sources de chaleur

Les chiffres des Tableaux 1 à 3 concernent des installations pilotes ou de démonstration qui ne sont pas disponibles sur le marché. Cela explique l'ampleur des fourchettes de prix et le niveau des maximas. Le *contracting* se multiplie dans les projets de grande puissances, là où les prix après subvention sont compétitifs. Dans ces cas, l'encouragement financier de l'OFEN représente environ 30% des surcoûts et 5 à 30% de l'investissement total.

Le segment entre 20 et 100 kW reste le plus difficile, essentiellement en raison des coûts élevés de la source de chaleur par rapport à la puissance de l'installation et à l'énergie produite. Au-delà, un nombre croissant de projets se réalisent sans appui financier des pouvoirs publics. La

phase de démonstration commence à produire ses effets: de plus en plus de projets deviennent compétitifs.

Systèmes	Nombre	Avec réseau CAD	Avec réseau de source	Combiné avec froid
Air/air	2	0	0	0
Air/eau monovalent	3	0	0	0
Air/eau avec appoint	1	1	0	0
Sol/eau monovalent	4	0	0	2
Eau/eau avec appoint	13	6	5	2
<i>Dont combinaison CCF et PAC</i>	2	2	0	0
Total	23	7	5	4

Tableau 2: Répartition par systèmes principaux; CAD: chauffage à distance; CCF: couplage chaleur-force

Puissance thermique de la PAC en kW	Total	Prix de revient chaleur en cts/kWh après subvention (mini / maxi)
0 à 20	4	21 / 40 (projets pilotes)
20 à 50	3	17 / 33
50 à 100	3	36 / 41
100 à 500	7	9 / 18
Plus de 500	6	10 / 23

Tableau 3: Répartition par puissance thermique de la PAC et prix de revient de la chaleur

Tous les projets soutenus à ce jour - en cours ou achevés - utilisent annuellement 61 GWh d'énergie de l'environnement et permettent l'économie de 5'700 tonnes de mazout par an.

Bâtiment locatif à Lutry/VD avec sondes en terre rechargées en été [23]: Vu l'exiguïté de la parcelles, les sondes géothermiques se situent sous le bâtiment, qui comprend 12 appartements et nécessite 37kW de puissance de chauffage. L'originalité réside dans la recharge des sondes géothermiques par des panneaux solaires

non vitrés qui améliore les performances de la pompe à chaleur. L'emploi de la désurchauffe pour la préparation d'eau chaude sanitaire ne pénalise pas l'efficacité de la pompe à chaleur.

Installation de pompe à chaleur simplifiée pour le chauffage d'une villa familiale à Prêles/BE [24]: L'installation – simplifiée au maximum – a été suivie de 1997 à fin 2000. Elle atteint de bons résultats mais à des coûts inférieures aux systèmes concurrents (pompes à chaleur du marché, chaudières à gaz ou au mazout). Les résultats seront intégrés dans le projet de recherche [9].

Erfolgskontrolle der Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Schotterkoffer im Mehrfamilienhaus in Muttenz/BL [25] et **Remplacement des chauffages électriques directs par des pompes à chaleur dans 8 villas à Genève** [26]: Les rapports présentent tous les aspects: bilan des consommations avant/après, coûts, leçons à tirer de la rénovation et recommandation pour de futures actions similaires.

Dans les projets en cours, soulignons l'originalité des projets **Centrale termica per produzione di acqua calda e fredda Grünenfelder Magadino/TI** et **PAC sur sondes géothermiques pour chauffage et refroidissement du bâtiment Seematter à Vevey/VD** 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 (voir [12]). Le potentiel d'application – particulièrement dans l'hôtellerie et la restauration – est important.

Les projets **Groupe à absorption pour une patinoire à partir d'un CAD au bois-énergie au Sentier/VD**, **Fernkälte mit Absorptions-WP aus Kehrrechtwärme Hauptbahnhof SBB Bern** et **Kälte- und Wärmeerzeugung für Eissporthalle St Jakob/BL** utilisent des machines à absorption pour la production de chaud et/ou de froid.

Les mandats s'orientent selon deux axes principaux: suivi à long termes d'installations choisies en fonction de leur potentiel de démonstration et de multiplication et validation sur le terrain de résultats du projet d'analyse *in situ* d'installations de pompes à chaleur (ANIS, ou FAWA en allemand). La prospection pour des projets dans les STEP/ARA sera effectuée en 2002 dans le domaine infrastructures de SuisseEnergie.

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 LES PI-LES A COMBUSTIBLE)

Durant l'année écoulée, nous n'avons reçu qu'une seule demande qui a été acceptée. Nous espérons soutenir une installation dans le cadre de la phase pilote du SwissMotor mais aucun projet ne nous est parvenu malgré nos efforts. En outre, le blocage par un recours du mandat d'infrastructure de SuisseEnergie a stoppé la recherche de sites d'implantation dans des STEP/ARA d'installations à mini-cogénération (puissance électrique de quelques kW, rendement électrique inférieur à 30%) fonctionnant au biogaz. En plus, un projet de ce type accepté en 2000 a été annulé pour des raisons techniques. Par conséquent, seuls 3 projets sont en cours dont un mandat de suivi. Ce sont :

- **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 production de biogaz – production de chaleur – vente de chaleur à des tiers.
- **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, soit de produire de l'électricité 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.
- **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.
- **BHKW mit Wärmeverbund der IVF Hartmann AG / Klärgas der ARA Röti/SH** [27]

L'élaboration de bases pour l'encouragement de la combinaison de groupes chaleur-force avec des pompes à chaleur est terminée pour les deux cantons pilotes de Genève et Neuchâtel. La suite à donner est en discussion avec les cantons et les réseaux d'acteurs concernés.

Pour plus de clarté et conformément à la straté

gie CCF de SuisseEnergie, les installations CCF à agents énergétiques fossiles (non renouvelables) seront intégrées au programme chaleur ambiante dès 2002. Les CCF utilisant des carburants renouvelables restent dans les programmes bois et biomasse. Les piles à combustibles seront regroupées dans un seul programme.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Die im Konzept 2000/2003 für das F+E- und das P+D-Programm im Bereich Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung [35] für das Jahr 2001 anvisierten Ziele konnten im Wesentlichen erreicht werden. Die gemeinsam mit Hochschulen und privaten Firmen bearbeiteten Forschungsarbeiten führten zu einer **neuen Generation von Wärmepumpen** für den Sanierungsmarkt ([1], [3], [5], [7], [8], [11], [17], [20]). Sie brachten bei der **Systemoptimierung** auch wesentliche Fortschritte auf dem Weg zu einer besseren Auslegung ([6], [9], [13], [21]) und einem optimaleren Betrieb ([4], [10], [12], [14]) von Wärmepumpenheizungssystemen. Die teilweise gemeinsam mit der chemischen Industrie durchgeführten Arbeiten ([15], [16], [18]) lieferten wertvolle Erkenntnisse zur Reduktion des Energiebedarfs komplexer **chemischer Prozesse**. Die Internetseite des Forschungsprogramms [35] findet mit monatlich rund 1000 heruntergeladenen Dokumenten eine erfreuliche nationale und internationale Beachtung. Zahlreiche P+D-Projekte helfen, das in der Forschung Erarbeitete in zuverlässig funktionierende Anlagen umzusetzen.

Bei der Herstellung und dem Vertrieb der im Rahmen des Forschungsprogramms entwickelten **neuen Wärmepumpengeneration** für den

Sanierungsmarkt konnte das ursprüngliche Ziel einer Beteiligung aller schweizerischen Hersteller leider nicht erreicht werden. Ein bedeutender Hersteller (SATAG Thermotechnik, Arbon) verlagerte seine Produktion ins Ausland. Der verbleibende schweizerische Hersteller fand einen potenten Schweizer Partner für Marketing und Vertrieb der neuen Wärmepumpengeneration.

Im Jahr **2002** sollen: (1.) die erste Generation von Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt aufgrund detaillierte Analysen des Verhaltens im realen Betrieb verbessert und (2.) weitere Grundsteine für eine zweite Generation mit natürlichen Kältemitteln gelegt werden. Bei der Systemoptimierung stehen Abschluss und Umsetzung der laufenden Projekte im Vordergrund. Neu sind Projekte vorgesehen zur:

- Verbesserung des Abtauvorgangs bei Luft als Wärmequelle,
- Verbesserung der Analyse der Biofilmbildung bei Schmutzwasser als Wärmequelle,
- Entwicklung einer neuen Diffusionsabsorptionswärmepumpen,
- Neugestaltung der Calc-Programme,
- sowie zum Test für Wärmepumpen mit kombinierter Heizung und Warmwasserbereitung.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

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

- [1] H. Baumann (hpbumann@bluewin.ch), BAUMANN ENGINEERING, Winterthur & FH Winterthur: **Ölfreier CO2-Kleinkompressor**, ENET 210125 (SB)
- [2] Ch. Dériaz (gadz@gkb.com), GEOTECHNIQUE APPLIQUEE DERIAZ, Petit-Lancy: **Chauffage et climatisation à l'aide de l'air de l'alluvion ancienne dénoyée**, ENET 210109 (SB)

- [3] J. Cizmar, E. Zahnd, FH *Burgdorf* & D. Trüssel (trd@kwt.ch) KWT KÄLTE-WÄRME-TECHNIK, AG, *Belp: Feldmessung einer Retrofit-Wärmepumpe*, ENET 210061 (SB)
- [4] B. Hubacher, M. Ehrbar (ehrb@ntb.ch), FH *Buchs: Dynamischer Wärmepumpentest, Phase 2 Validierung des Modellansatzes und Entwicklung einer Prüfprozedur*, ENET 210127 (SB)
- [5] A. Zingerli, M. Ehrbar (ehrb@ntb.ch), FH *Buchs: Charakteristiken von Vielzellen- und Scrollkompressoren*, ENET 210011 (SB)
- [6] G. Zweifel (gzeifel@hta.fhz.ch), M. Achermann, R. von Euw, FH *Horw* & M. Stalder, Stalder, Rifferswil & M. Erb, Eicher+Pauli, *Liestal* & E. Shafai, IMRT / ETH *Zürich: Ausbau der Calc-Programme, Phase 1: Konzept und Pflichtenheft*, ENET 210154 (SB)
- [7] Th. Kopp (thomas.kopp@hsr.ch), M. Deller, K. Baschnagel, FH *Rapperswil* & D. Trüssel, KWT KÄLTE-WÄRME-TECHNIK AG, *Belp* & K. Eggenschwiler, EMPA *Dübendorf: Wärmequelle Luft für Retrofitwärmepumpen*, ENET 210164 (JB)
- [8] Th. Kopp (thomas.kopp@hsr.ch), FH *Rapperswil* & NEK Umwelttechnik, *Zürich* & KAPAG, *Zumikon* & Ecopac, *Herrliberg: Kleinwärmepumpe mit Ammoniak, Phase 2: Bau eines Funktionsmusters*, ENET 210012 (SB)
- [9] Th. Afjei (t.afjei@fhbb.ch), U. Schonhardt, FH *Muttenz* & G. Zweifel, M. Achermann, R. von Euw, FH *Horw*, & H.R. Gabathuler, GABATHULER AG, *Diessenhofen*, & M. Erb, Eicher+Pauli, *Liestal* & P. Renaud PLANAIR, *La Sagne: Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen*, ENET 210159 (JB)
- [10] H.R. Gabathuler, H. Mayer (gabathuler.ag@bluewin.ch), GABATHULER, *Diessenhofen* & E. Shafai, R. Wimmer, IMRT/ETH *Zürich: Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase 2*, ENET 210160 (JB)
- [11] H.R. Gabathuler, H. Mayer (gabathuler.ag@bluewin.ch), GABATHULER AG, *Diessenhofen* & ROSCHI & PARTNER, *Ittigen* & KWT KÄLTE-WÄRME-TECHNIK AG, *Belp* & FH *Burgdorf: Messungen an Retrofit-Wärmepumpen, Phase 2*, ENET 210156 (JB)
- [12] A. Huber (huber@igzh.com), P. Widmer, Huber Energietechnik, *Zürich* & Th. Nussbaumer, Verenum, *Zürich* & D. Trüssel, KWT KÄLTE-WÄRME-TECHNIK, AG, *Belp* & Ch. Schmid : *Gekoppelte Kälte- und Wärmeerzeugung mit Erdwärmesonden, Handbuch zum Planungsvorgehen*, ENET 210001 (SB)
- [13] Th. Kohl (kohl@geo.phys.ethz.ch), S. Signorelli, Institut für Geophysik, ETH-*Zürich: Validieren des Programms EWS und Optimieren der Erdwärmesondenlänge*, ENET 210155 (JB)
- [14] D. Zogg, E. Shafai (shafai@imrt.mavt.ethz.ch), Institut für Mess- und Regeltechnik / ETH *Zürich: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen - Phase 5: Test der Fehlerdiagnosesysteme*, ENET 210136 (SB)
- [15] P. S. Bieler, K. Hungerbühler (hungerb@tech.chem.ethz.ch), Laboratorium für technische Chemie / ETH *Zürich: Analyse und Modellierung des Energiebedarfs in Batch-Prozessen*, ENET 210162 (JB)
- [16] Th. Hofstetter, Ch. Capello, K. Hungerbühler (hungerb@tech.chem.ethz.ch), Laboratorium für technische Chemie / ETH *Zürich: Abfalllösungsmittelmanagement in der chemischen Industrie*, ENET 210161 (JB)
- [17] S. Guex, D. Favrat (daniel.favrat@epfl.ch), Laboratoire d'énergie industrielle / EPF *Lausanne*, Electricité de France, *Moret-sur-Loing*, , SATAG THERMOTECNIK, *Arbon: Pompe à chaleur air-eau à haute température, phase 2*, ENET 210018 (JB)
- [18] P. Krummenacher, D. Favrat (daniel.favrat@epfl.ch), Laboratoire d'énergie industrielle / EPF *Lausanne: Intégration énergétique de procédés discontinus à l'aide d'algorithmes génétiques*, ENET 210144 (SB)
- [19] A. Roubaud, D. Favrat (daniel.favrat@epfl.ch), Laboratoire d'énergie industrielle / EPF *Lausanne: BiogasMotor*, ENET 210164 (JB)

- [20] M. Zehnder, D. Favrat (daniel.favrat@epfl.ch), Laboratoire d'énergétique industrielle / EPF Lausanne: **Migration d'huile dans les pompes à chaleur**, ENET 210158 (JB)
- [21] M. Stalder (m.stalder@energienetz.ch), Ingenieurbüro Rifferswil & A. Huber, Energietechnik, Zürich & S. Albrecht, Informatik, Winterthur: **Erweiterung der Programms WPcalc mit dem Berechnungsmodul für Erdwärmesonden EWS**, ENET 210110 (SB)
- [22] S. Roth (stefan.roth@axpo.ch), A. Montani, Wärmepumpen-Testzentrum Töss, Winterthur & M. Ehrbar, FH Buchs & K. Eggenschwiler, EMPA Dübendorf: **Vertretung der Schweiz in Arbeitsgruppen des CEN TC113**, ENET 210163 (JB)

Liste des Projets P+D (dont un rapport est paru en 2001)

- [23] B. Matthey, Ingénieurs-Conseils SA, Montézillon, **Bâtiment locatif à Lutry/VD avec sondes en terre rechargées en été**, (SB)
- [24] Renaud P., Guerra E., Kernen M., Chapatte M, Planair SA *La Sagne*, (info@planair.ch), **Installation de pompe à chaleur simplifiée; pour le chauffage d'une maison familiale à Prêles (BE) (saisons 1997/1998, 1998/1999 et 1999/2000)**, ENET 210100 (SB)
- [25] Thüler Adrian, Elektra Birseck EBM, Münchenstein, (elektra-birseck@ebm.ch), **Erfolgskontrolle der L/W-Wärmepumpe mit Schotterkoffer im MFH**, (SB) ENET 210085 (SB)
- [26] Conti & Associés Ingénieurs SA, Versoix, **Remplacement des chauffages électriques directs par des pompes à chaleur dans 8 villas à Genève; Rapport après mise en service et réception finale**, ENET 210075 (SB)
- [27] Röck P. M., Colenco Power Engineering AG, Baden, (info@colenco.ch), **BHKW mit Wärmeverbund der IVF Hartmann AG mit Klärgas aus der ARA Röti/SH** ENET 210076 (SB)

Referenzen

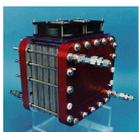
- [28] **Die Wärmekraftkopplung im Programm EnergieSchweiz**, Strategie zur Wärme-Kraft-Kopplung, Bundesamt für Energie, 2001, ENET 21011
- [29] Th. Afjei: **Standard hydraulic circuits for small-scale heat pump plants**, IEA HPP / IPUHPC workshop *Hans-on Experiences with Heat Pumps in Buildings*, October 2001, Arnhem (NL).
- [30] Th. Afjei, A. Huber, A. Bühring: **Wärmepumpenheizung für Niedrigenergiehäuser**, gemeinsames Seminar der FH-Basel und der FWS, MuttENZ, Juni 2001, ENET 210126.
- [31] P. Krummenacher: **Contribution to the Heat Integration of Batch-Processes**, Thèse, EPF Lausanne, 2001.
- [32] D. Zogg, E. Shafai, H.P. Geering: **A Fault Diagnosis System for Heat Pumps**, Preprints CCA-70, IEEE Joint International Conference on Control Applications (CCA) & International Symposium on Intelligent Control (ISIC), September 2001, Mexico City.
- [33] M. Zogg (Hrsg.): **Neue Wege zur Heizungssanierung mit Wärmepumpen**, Tagungsband zur 8. UAW-Tagung vom 8. Mai 2001, Bundesamt für Energie, 2001, ENET 210047.
- [34] M. Zogg: **Wärmepumpen für die Heizungssanierung: Probleme und Lösungen**, Fachvorträge des Informationszentrums Wärmepumpen und Kältetechnik (IZW) an der Sonderchau Wärmepumpen der internationalen Messe für Kälte, Klima und Lüftung (IKK) 2001 am 11. Okt. 2001 in Hannover und [28] S. 11/19.
- [35] **Internetsite des Forschungsprogramms www.waermepumpe.ch/fe**. Rubrik Berichte: Download von Zusammenfassungen und der ausführlichen Schlussberichte durchgeführter Forschungsarbeiten; Rubrik *Publikationen*: Download von Publikationen des Programmleiters.
- [36] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2000 – 2003**, ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, www.energie-schweiz.ch/bfe/de/forschung

BRENNSTOFFZELLEN

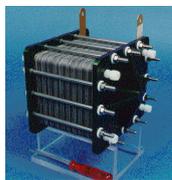
Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2001

Alphons Hintermann

alphons.hintermann@bfe.admin.ch



1997
500 W
22 kg/kW



1998
1000 W
13 kg/kW



1999
2500 W
6.5 kg/kW



2001
8000 W
2.7 kg/kW

Leistungszenit der PSI-PEM-Zellentechnologie erreicht

Seit 2001 heisst die neue Zielrichtung in der PSI-Zellentechnologie: **Kostensenkung und hin zur industriellen Fertigung**. Das PSI und die ETH-Zürich gehen in den nächsten Jahren dieses Problem unter Einbezug der gesamten industriellen Wertschöpfungskette gemeinsam an.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die im Jahr 2000 beim BFE eingeführte Teilung des Programms *Brennstoffzellen* in zwei Teilprogramme wurde im Berichtsjahr beibehalten:

- Das Programm **Wasserstoff- und Methanol-Brennstoffzellen** wurde von A. Hintermann (BFE) und
- das Programm **Erdgas-Brennstoffzellen** wurde von M. Rügsegger (BFE) geleitet.

Die gemeinsamen Schwerpunkte beider Programme sind nach wie vor:

- Das Brennstoffzellen Know-How in der Schweiz sichern und vertiefen, die Produktionsprozesse optimieren und die Produktionskosten verringern.
- Vermehrtes Umsetzen der Resultate aus der langjährigen Forschung durch Unterstützen und Realisieren von P+D-Anlagen: sammeln von Praxiserfahrungen mit den von uns entwickelten Brennstoffzellenanlagen und Vergleiche mit herkömmlichen Lösungen, die wiederum zu neuen Impulsen für die Forschung und Entwicklung Anlass geben.
- Prüfen der Markttauglichkeit und Ausloten von Schwachstellen der Schweizer Brennstoffzellen zusammen mit starken Industriepartnern, die gewillt sind, Produkte mit Brennstoffzellen im Markt einzuführen oder Komponenten von Brennstoffzellen herzustellen.
- Eine verstärkte Zusammenarbeit und Vernetzung von Forschern, Fachhochschulen (FH) und verschiedenen Zulieferindustrien entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Brennstoffzellen.

Das Paul Scherrer Institut (PSI) hat seit 1988 über 100 Mannjahre in die Forschung von Polymer-Elektrolyt-Membran Brennstoffzellen (PEM-FC) investiert. Im BFE-Programm **Wasserstoff/Methanol-Brennstoffzellen** werden die langjährigen Aktivitäten des PSI weiterhin gefördert mit der Zielsetzung, diesen Forschungsschwerpunkt längerfristig zu sichern. Schwerpunkte der BFE Unterstützung sind einerseits die PSI PEM-FC-Technologie in die industrielle Fertigung zu führen und andererseits die Demonstration der PSI-Zelle in alltagstauglichen Anwendungen (inklusi-

ve Ausmerzung auftauchender Schwachstellen im Alltagsgebrauch).

Bei den **Erdgas-Brennstoffzellen** werden die seit 1991 laufenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Zusammenhang mit der Sulzer HEXIS Solid-Oxide-Brennstoffzelle (SOFC) fortgesetzt. Nach erfolgreichen ersten Feldversuchen (1994–96) standen in den Jahren 1997 – 2000 Feldtestsysteme als wichtiger Bestandteil für die künftige Markteinführung im Vordergrund. Die im Berichtsjahr erfolgreich durchgeführte Zertifizierung des SULZER HEXIS-Brennstoffzellensystems ist dazu eine unabdingbare Notwendigkeit.

Generell wurden die Schwerpunkte für die Forschung und deren Umsetzung gemäss dem Konzept der Energieforschung des Bundes verfolgt. Zuhanden der CORE waren für beide Teilprogramme ein detailliertes Forschungs- und Umsetzungsprogramm für die Jahre 2000 – 2003 fällig. In beiden Programmen sollte die angestrebte Vertiefung der Kontakte mit Fachhochschulen und deren Einbindung ins Programm mit neuen Projekten weiter konkretisiert werden.

Spezifische Ziele 2001 des Programms **Wasserstoff- und Methanol-Brennstoffzellen** waren:

- Unterstützung der Demonstration dieser Zellentechnologie in einem Familienauto (Start BRESA-Projekt) sowie beim Boot Hydroxy 2000.
- Fortschritte beim Brennstoffzellenprüfstand an der FH-Biel.
- Verstärkung der Zusammenarbeit des PSI mit verschiedenen Fachhochschulen (Grenchen, Yverdon, Biel) zwecks Umsetzung der PEM-FC-Technologie.
- Start des PowerPac-Projekts (1-kW-Brennstoffzellen-System)

Spezifische Ziele 2001 im Programm **Erdgas-Brennstoffzellen** waren:

- Erarbeitung eines neuen *Anode supported PEN* Design für SOFC-Brennstoffzellen.
- Konzepte für SOFC mit CO₂-neutralen Brennstoffen wie Biogas oder Klärgas.
- Abschluss der Zertifizierung einer HEXIS-Brennstoffzelle im Einsatzbereich Haustechnik nach EU-Standard.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

WASSERSTOFF UND METHANOL PEM-BRENNSTOFFZELLEN

Die grundlagenorientierten Arbeiten des PSI zur Entwicklung verbesserter und kostengünstiger Komponenten für PEM-FC wurden im Projekt **Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H₂ oder Methanol als Brennstoff** [1] fortgeführt. Mit der Entwicklung verbesserter und kostengünstiger Elektroden, Membranen, etc. leistet das PSI einen Beitrag für den breiten Einsatz dieser Technologie.

In einem Projektschwerpunkt werden bei der H₂/Luft-PEM-FC Elektrokatalysatoren für die Sauerstoffreduktionsreaktion gesucht, die eine geringere Überspannung aufweisen und damit einen besseren Wirkungsgrad erlauben. Gleichzeitig sollen durch Zulegierung einer unedlen Komponente der Edelmetallgehalt und damit auch die Kosten gesenkt werden. Auf Kohlenstoff geträgerte Katalysatoren des Typs PtX/C (X = Co, Ni, Fe) zeigten bei gleicher Gesamtmetallbeladung im Vergleich zu Pt/C bei konstanter Stromdichte in den Halbzellen eine verbesserte Aktivität. Dies sollte nun auch in Brennstoffzellen mit realen Gasdiffusionselektroden (GDE) nachgewiesen werden. Mikrostrukturierte, platierte Glaskohlenstoffelektroden dienen als Modell für die Aktivschicht einer realen GDE. Beide Elektroden werden in Kontakt zum polymeren Festelek-

trolyten durch H₂-Unterpotentialabscheidung charakterisiert, um die Ankopplung des Elektrokatalysators Platin an den Festelektrolyten (Ausnutzung) zu proben. Aussagen darüber erlauben eine Optimierung der Aktivschicht im Hinblick auf eine optimale Ausnutzung des Platins (Überspannung, Kosten). Die Charakterisierung von auf Kohlenstoff geträgerten PtCo Katalysatoren für die Sauerstoffreduktionsreaktion erfolgte in Halbzellen und in Brennstoffzellen. Die Brennstoffzellenversuche mit kommerziellen GDE zeigen, dass die Vorteile dieser Katalysatoren in den verfügbaren kommerziellen GDE bisher nicht zum Tragen kommen. Eine *ex situ* Charakterisierung der GDE-Aktivschicht zeigt, dass der spezifizierte Edelmetallgehalt und die Morphologie eine Rolle spielen können. Die definitiven Gründe für das schlechtere Verhalten der GDE sind jedoch noch unklar. Modellelektroden aus mikrostrukturierten und platinieren Glaskohlenstoffoberflächen in Kontakt zum Festelektrolyten *protonen-leitende* Membran verhalten sich in ihrer Phänomenologie der H₂-Unterpotentialabscheidung wie GDE. Dies ermöglicht, zukünftig die Eigenschaften der Aktivschicht von GDE anhand der einfacheren Geometrie der Modellelektrode auch mit Wechselstromimpedanzmessungen zu untersuchen und die Transportprozesse zu modellieren.



Figur 1: Flüssiggespeiste Direkt Methanol/Luft Brennstoffzelle, 100 cm² aktive Fläche, paralleles Flussfeld: Eingang Flussfeld links oben, Ausgang Flussfeld unten Mitte: Neutronenradiografie der Massenstromverteilung H₂O+MeOH (dunkel) vs. CO₂ (hell) auf der Anodenseite (linke Bildhälften). Lokale Stromverteilung (9 Segmente, rechte Bildhälften) Zellenstrom: linkes Bild 6 A (60 mA/cm²), rechtes Bild 22 A (220 mA/cm²). (Bildquelle PSI)

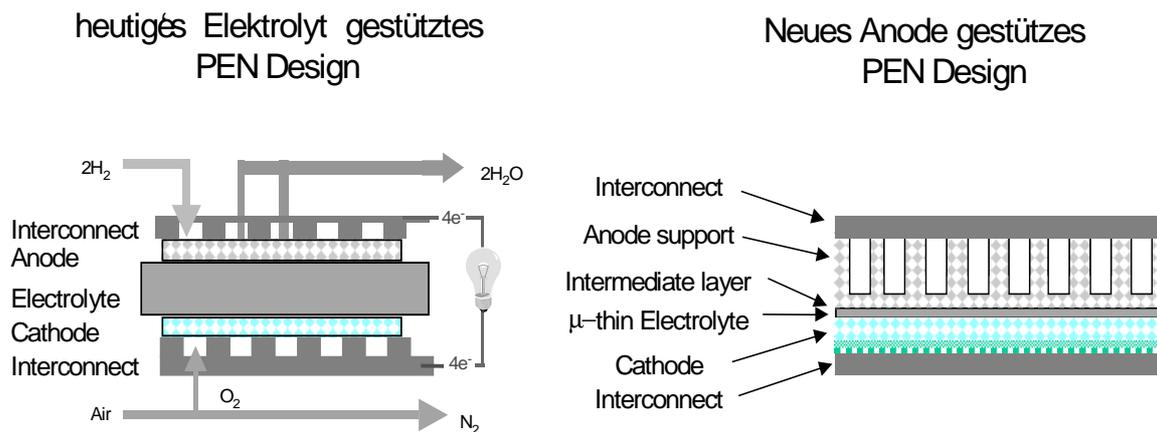
Ein zweiter Projektschwerpunkt liegt im Bereich des atomaren/molekularen Verständnisses der in Brennstoffzellen ablaufenden Reaktionen. Dazu wurden Grundlagen für *in situ* diagnostische Charakterisierungsmethoden von Brennstoffzellen erarbeitet. Die kombinierte Methodik der Neutronenradiographie und der orts aufgelösten Strommessung wurde entwickelt und in weltweit erstmaligen simultan Messungen an Direkt-

Methanol/Luft Brennstoffzellen als *in situ* diagnostische Methode demonstriert (Fig.1). Nachgewiesen wurde, dass überraschenderweise der dominierende Einfluss auf die Stromverteilung anscheinend vom Massenfluss der Kathodenseite herrührt. Untersucht wurden zum einen die Probleme des Massentransports auf der Anodenseite von Direkt-Methanol-Brennstoffzellen, an der das flüssige MeOH/H₂O Gemisch (Brennstoff)

zum gasförmigen Produkt CO_2 umgesetzt wird, das aus der Zelle entfernt werden muss. Mit dieser in situ Abbildungsmethode, der Neutronenradiografie, wurde dieser Massentransport visualisiert und gleichzeitig dessen Einfluss auf die Stromverteilung durch orts aufgelöste Messungen untersucht. Ziel ist die Optimierung des Anodenflussfeldes im Hinblick auf einen optimalen Massenfluss. Diese Methoden können auch auf Fragestellungen des Massenflusses bei der H_2 /Luft Brennstoffzelle übertragen werden. Zum anderen wird die Wechselstromimpedanzmethode bei H_2/O_2 -Brennstoffzellen eingesetzt, um grundlegende Prozesse der Membranbefeuchtung zu verstehen. Damit konnte erstmalig der Einfluss der Befeuchtungsbedingungen auf die Ionomerphase in der Anodenaktivschicht und damit auf die Überspannung der H_2 -Oxidationsschicht demonstriert werden. Ein Einfluss auf die Leitfähigkeit des Elektrolyten selbst war am PSI schon vorher gezeigt worden. Diese Ergebnisse sind wichtig für die Beschreibung der elektrochemischen Elementarvorgänge in der Zelle.

ERDGAS BRENNSTOFFZELLEN

Anode Supported PEN for SOFC [2]: Das Konsortium der Partner EMPA, ETH-Zürich, ETH-Lausanne und Sulzer Innotec erarbeitet eine neue SOFC-Zelltechnologie mit hohem Wirkungsgrad und tiefen System- und Betriebskosten. Fachkompetenz in Materialforschung und Erarbeitung von Fabrikations-Grundlagen bilden die Basis der Zusammenarbeit. Zielsetzung ist, mit einem neuen Zellendesign (Fig.2) die Produktionsprozesse zu optimieren und die Produktionskosten für die Stapelherstellung zu verringern. Bei Testzellen von 35 mm Durchmesser konnte eine Spannung von über 1 Volt und Leistungsdichten von 400 mW/cm^2 bei $700 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen werden. Bei den anfänglich entwickelten Substraten konnte eine sehr gute Redoxstabilität gemessen werden. Das Upscaling auf 120 mm Zelldurchmesser ist noch im experimentellen Stadium, fordert jedoch zusätzliche Optimierungsschritte bei den Zellenherstellungsprozessen und zur Erhaltung der guten Redoxstabilität.



Figur 2: Skizze eines SOFC-Stack Elements (PEN) bestehend aus Kathode, Elektrolyt, Anode und Interkonnekt. Links das herkömmliche Design, rechts das neue, Anode gestützte PEN-Design. (Bildquelle EMPA)

Als Konsequenz wurden Mitte letzten Jahres alternative Fabrikationsprozesse ins Auge gefasst und in der Folge untersucht. Interessante und vielversprechende Resultate konnten beim Besprayen von Zellen mit 50 mm Durchmesser und beim Siebdrucken von Zellen mit 120 mm Durchmesser gewonnen werden. Ausserdem wurden Benchmark Tests für 120 mm Durchmesser mit Sulzer HEXIS Einzelzellen durchgeführt und die Testprozeduren für künftige Leistungs- und elektrochemische Potenzial Messungen bereitgestellt.

Mit dem Ende 2001 neu gestarteten Projekt **SOFC-APU Advanced Fuel Cell Stack** [3] sollen verschiedene Konzepte für das Zellen-Element eines SOFC Stapels untersucht und ausgelegt werden, die den Anforderungen einer *Auxiliary Power Unit* (APU) genügen könnten. Im Vordergrund stehen dabei die Reduktion von Volumen und Gewicht des Elementes und die Abdichtung der Massenströme. Ein marktreifes Produkt hat ein grosses Absatzpotenzial in der Automobilindustrie.

Nationale Zusammenarbeit

Sowohl in der PEM-FC- wie in der SOFC-Forschungsszene herrscht eine aktive Zusammenarbeit der Hochschulforscher mit Industriepartnern und Fachhochschulen. Gestärkt wurde die bisherige Zusammenarbeit des PSI mit der FH Yverdon für Boots-Applikationen durch die Verlegung der Produktion der PSI-PEM-FC-Zellen an die FH-Biel.

In der massgebend vom PSI und der ETH-Zürich geprägten PEM-FC-Szene ist die Zusammenarbeit mit der Industrie nach wie vor nicht genügend etabliert. Ein wichtiger Grund dafür ist das langwierige Genehmigungsverfahren des PowerPac-Projekts bei der KTI (Vorprojekt [6]). Ein wesentliches Ziel des PowerPac-Projekts ist, möglichst viele Industriepartner an der im Projekt zu entwickelnden neuen PSI-ETHZ-PEM-Zellentechnologie teilhaben zu lassen. Durch ihre aktive Teilnahme am Projekt können sich die Industriepartner (meist KMU) gleichzeitig ein reales Bild über ihre Marktchancen bei einer künftigen breiten Markteinführung der Brennstoffzellentechnologie machen. Die kritische Frage, ob sich hier neue Marktchancen öffnen oder nicht, kann nur dann professionell beurteilt werden, wenn das notwendige Wissen über die Technologie und deren Komponenten, die Vor- und Nachteile, Chancen und Risiken in genügender Tiefe vorliegt. Initialisiert durch das PowerPac-Projekt soll mittelfristig ein Netzwerk von Forschern, potentiellen Anwendern und Produzenten entlang der gesamten Wertschöpfungskette der PEM-FC-Technologie aufgebaut werden, um künftig das

Technologiewissen zu transferieren und ein Brennstoffzellensystem im Leistungsbereich bis 1 kW als gemeinsame Produkteplattform zu entwickeln.

In ihrem Interview in den ENET-News [18] haben die beiden BFE-Programmleiter eine klare BFE-Haltung zur künftigen Förderung von Forschung und Entwicklung im Brennstoffzellenbereich deklariert und ihre Meinung bezüglich der Markteinführung dieser Technologie ausgedrückt: Fokussierung auf eigene Fachkompetenz, konkrete Problemlösungen und Neuentwicklungen in enger Zusammenarbeit mit Hochschulen, Fachhochschulen und Industriepartnern. Nischenanwendungen haben höhere Chancen, in einem Zeithorizont von 5 – 10 Jahren auf dem Markt zu erscheinen. Dort, wo die Brennstoffzellentechnologie in einen Verdrängungsmarkt eindringt oder falls zusätzlich hohe Kosten für den Aufbau von Infrastruktur anfallen, ist eine breite Markteinführung der Brennstoffzellentechnologie in den nächsten zwanzig Jahren kaum zu erwarten. Es ist also noch genügend Zeit für gute Forschungs- und Entwicklungsarbeit vorhanden.

Für den Bereich **H₂/Methanol-Brennstoffzellen** wurde im Berichtsjahr das Forschungs- und Umsetzungsprogramm 2000 – 2003 [19] zuhanden der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE ausgearbeitet. In diesem Programm sind die Richtlinien für Forschungs- und Entwicklung für die nächsten Jahre aufgezeigt.

Internationale Zusammenarbeit

Die Aktivitäten im Rahmen des IEA *Advanced Fuel Cell Agreement*, Annex XIII: *Solid Oxide Fuel Cell* sind unverändert abgewickelt worden. Anfang 2001 wurde unter dem Titel *Materials and Processes for SOFC* ein von der IEA und der *European Science Foundation* gemeinsam organisiertes *Topical Meeting in Les Diablerets* abgehalten. Obwohl die Kosten des Meetings von der EU getragen wurden, fanden sich keine Teilnehmer aus Übersee ein.

Im Mai 2001 (Capri) und September 2001 (Basel) fanden das 22. resp. das 23. *Executive Committee* des IEA Programms *Advanced Fuel Cells* statt. Wie aus den Protokollen und weiteren Unterlagen der Meetings zu entnehmen ist,

standen eher der gegenseitige Informationsaustausch als ein direkter Nutzen für unsere Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen im Vordergrund.

Ziel des **IEA Annex XII (1999–2003) Stationäre Brennstoffzellen** [4] ist das Erkennen von Rahmenbedingungen und Voraussetzungen für den Einsatz und die Verbreitung von stationären Brennstoffzellen in verschiedenen Ländern. Die aktuelle Marktbeobachtung zeigt Vorserienfabrikate von Kleinbrennstoffzellen (PEFC) als Hausenergiezentralen verschiedener amerikanischer und europäischer Hersteller. Deutsche Energieversorger haben Feldtests gestartet (200 Anlagen als virtuelle Kraftwerke). Im mittleren bis grossen

Leistungsbereich werden alle vier Typen von Brennstoffzellentechnologien eingesetzt und weiterentwickelt. Pilotanlagen mit Hybridsystemen (Brennstoffzellen/Gasturbinen) sind in Vorbereitung.

Am 3. – 6. Juli fand im Kongresszentrum in Luzern die Brennstoffzellentagung *Fuel Cell 2001*

statt. Den wissenschaftlichen Teil *1st European PEFC Forum* organisierte das PSI. International anerkannte Spezialisten präsentierten ihre Arbeiten. Parallel dazu fand eine Ausstellung von Brennstoffzellenherstellern und –anwendern statt, die auf reges Interesse stiess und auch wertvolle Informationen für die Forscher lieferte.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

WASSERSTOFF UND METHANOL PEM-FC

Die Umsetzung und Austestung der PSI/ETHZ-Brennstoffzellentechnologie – inklusive Systemaspekte in alltagstauglichen Anwendungen – ist

ein wesentliches Anliegen des Programms *H₂/Methanol-Brennstoffzellen 2000–2003* [19]. Nur so können Systemfehler, die im allzeit optimierten Laborbetrieb nie auftreten, rechtzeitig erkannt und ausgemerzt werden.



Figur 3: Ansicht des PSI-PEMFC-Systems mit den 6 Stapeln (sichtbar sind auch die Spannungsüberwachung und Teile der Luft- und Wasserstoffführung). (Bildquelle PSI)

Das Ziel des gemeinsam mit dem **Programm Verkehr und Akkumulatoren** finanzierten Projekts **BRESA** [5] ist es, einen Antriebsstrang zu entwickeln, der ein vollwertiges Auto mit Brennstoffzellen und Supercapazitäten (Supercaps) antreiben kann. In enger Zusammenarbeit verschiedener Hoch- und Fachhochschulinstiute, KMU und VW soll ein familientaugliches Fahrzeug mit einer PSI-PEM FC (siehe Fig. 3 und Titelbild) und einem Supercap-Zwischenspeicher ausgerüstet werden. Die Bedeutung dieses Projekts besteht darin, dass im Fahrzeug mit einer Brennstoffzelle potenziell höhere Wirkungsgrade gegenüber einem Verbrennungsmotor erzielt werden können und mit einem Speicher für elektrische Energie, der hohe Leistungsflüsse zulässt, Beschleunigungs- und Bremsleistungsspitzen abgefangen werden können. Diese Wirkungsgradvorteile kommen dann voll zum tragen, wenn langfristig auf Treibstoffe umgestiegen werden muss, die aus nachhaltig erzeugbaren Energiequellen gewonnen werden. In der Zwischenzeit, in der Wasserstoff aus fossilen

Energieträgern erzeugt wird, belasten diese Umwandlungsschritte die energetische Gesamtkette. Ein weiteres Ziel dieses Projektes ist es, neue technologische Erkenntnisse in einem technisch relevanten Massstab darzustellen und in der Privatwirtschaft Partner für eine Umsetzung in eine Produkteentwicklung zu finden. In der Berichtsperiode ging es darum die Komponenten des Systems zu vervollständigen und zu einem Gesamtsystem zu integrieren. Anfang 2002 soll das Prototyp-Fahrzeug einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt werden.

Als **Vorprojekt zur Bildung eines Brennstoffzellennetzwerkes in der Schweiz (PowerPac)** [6] wurden im Frühjahr 2001 in Zusammenarbeit des PSI mit dem Zentrum für Produkteentwicklung der ETH-Zürich zwei Seminare mit Industriebeteiligung organisiert. Die PowerPac-Technologie beinhaltet neue Fertigungs- und Komponententechnologien für PEM FC. Im Verlaufe dieses Vorprojekts wurden 14 Unternehmen und zwei Hochschulinstitute für das bei der

KTI einzureichenden PowerPac-Projekts (Demonstration der Innovationen und der Machbarkeit der PowerPac-Technologie an einem 1-kW-System) zusammengeführt. Zu diesen Unternehmen kommen noch rund ein Dutzend Unternehmen, die sich für den Fortschritt der Brennstoffzellentechnologie und des Projektes interessieren. Mittels Seminarien, bilateralen Gesprächen und der neu geschaffenen Internetumgebung www.powerpac.ch wurde schon ein gewisses Know-how transferiert und das entsprechende Interesse an der Technologie geweckt. Handlungsbedarf für ein Netzwerk besteht: Viele Firmen sind wohl an direkten Informationen interessiert, möchten sich aber in diesem Technologiebereich momentan noch nicht finanziell engagieren, da für sie die Möglichkeiten für neue Produkte noch zu weit in der Zukunft liegen.



Figur 4: Mögliches Design (Semesterarbeit) für ein tragbares PowerPac-System. (Bildquelle PSI)

Die Arbeiten zum PowerPac-Projekt wurden im Berichtsjahr mit PSI/ETH-Mitteln weiter verfolgt und verschiedene Diplom- und Semesterarbeiten (Fig. 4) wurden dazu ausgeführt. Ferner soll in einem jährlich zweimal erscheinenden Newsletter [20] über den Projektfortschritt berichtet werden.

Im Rahmen früherer Pilotprojekte wurden an der FH Yverdon Erfahrungen mit verschiedenen PSI-PEM-FC betriebenen Booten – wie Hydroxy 300 – gesammelt. Zusammen mit der Bootsbauerfirma *MW-Line* und der FH Yverdon wird im Jahr 2002 das 6-Personen-Boot Hydroxy 2000 (Fig. 5), das in Katamaranbauweise eine Geschwindigkeit von 10 – 15 km/h aufweisen soll, zur Ausführung gelangen.

Mit den beiden Projekten *Pile PEM pour Hydroxy 2000* [7] und *Intégration des systèmes pour Hydroxy 2000* [8] sind einstweilen die Konstruktion der PSI-PEM-FC (Fachhochschule

Biel, in Zusammenarbeit mit dem PSI) und die Systemintegration (FH Yverdon) der PEM-FC gesichert und in Bearbeitung.



Figur 5: Design des speziell für Brennstoffzellenantrieb optimierte Luxusboots Hydroxy 2000. (Bildquelle FH Yverdon)

ERDGAS BRENNSTOFFZELLEN

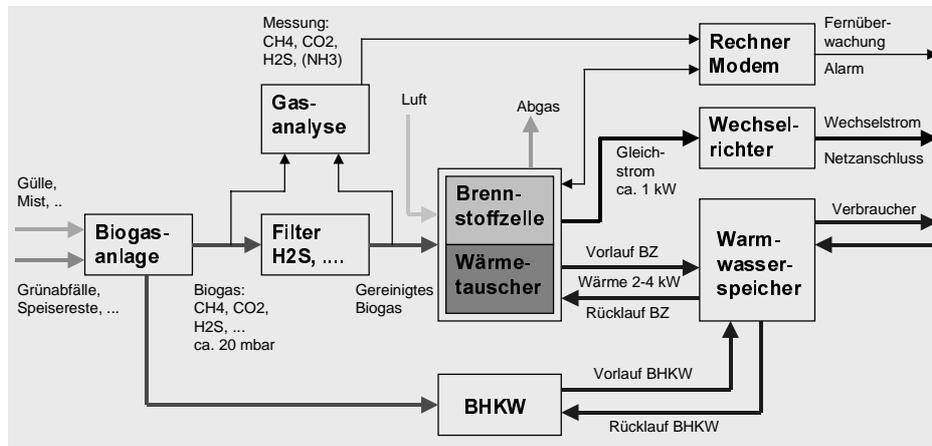
Im Projekt *Pilot-Anlage Biogas - HEXIS* [9] wird auf einer landwirtschaftlichen Biogasanlage in Lully (VD) (Fig. 6 und Fig. 7) erstmals eine SOFC der Sulzer Hexis AG (Winterthur) mit Biogas betrieben. Projektpartner sind die EREP SA (Biogasversorgung, Koordination der Arbeiten vor Ort und Marktstudie) und die ETH-Lausanne (Gasanalyse). Brennstoffzellen können im Vergleich zu motorischen Blockheizkraftwerken (BHKW) emissionsärmer betrieben werden. Hochtemperatur-Brennstoffzellen eignen sich vor allem wegen der geringen Anforderung an die Gasqualität für die Verwendung von Biogas als Brennstoff. Der Einsatz der SOFC-Technologie eignet sich für den kleinen Leistungsbereich wegen des vergleichsweise einfachen Systemaufbaus.

Diverse Vorversuche zur Elektrochemie und zum *Fuel-Processing* mit synthetischem Biogas führten zur Entscheidung, das Biogas für die elektrochemische Umsetzung im Zellstapel mit *Steam-Reforming* aufzubereiten. Der Betrieb des angepassten Brennstoffzellen-Systems im Labor zeigte nur einen geringen Einfluss des CO₂-Anteils im Biogas auf die Leistung und den Wirkungsgrad des Systems. Die Ergebnisse sind mit denen der erdgasbetriebenen Feldtestanlagen vergleichbar. Mit der Feldtestanlage (Fig. 6) in Lully kann erstmals der erfolgreiche Betrieb eines Brennstoffzellensystems für Biogas als Brennstoff im kleinen Leistungsbereich gezeigt werden. Die positiven Ergebnisse der Laborversuche werden bestätigt. Die Gasreinigung erfolgt in einem dreistufigen Aktivkohlefilter, der die wesentlichen Verunreinigungen (Schwefelwasserstoffe, Chlor-

verbindungen, Ammoniak) zurückhält. Mit einer Gasanalyse werden Gaszusammensetzung und Filterzustand kontinuierlich überprüft.

Nach Abschluss verschiedener Messungen zum Einfluss der Biogasqualität auf Leistung und Be-

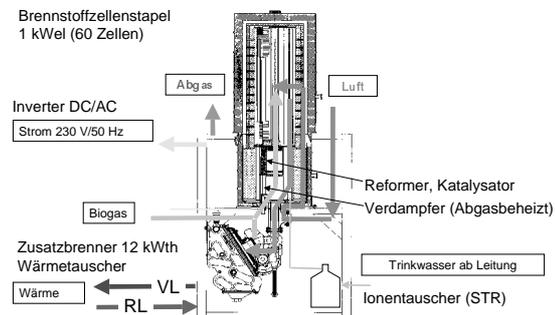
triebsverhalten des Systems wird im Januar 2002 ein neuer Zellstapel installiert. Die volle elektrische Leistung soll dann erzielt werden können und der Dauerbetrieb demonstriert werden.



Figur 6: Prinzipschema der Biogasanlage in Lully (Bildquelle Sulzer)

Im August 2000 wurde in Birsfelden eine Brennstoffzelle vom Typ ONSI PC 25C (Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC) in Betrieb genommen. Die mit dem Projekt **Demonstrationsanlage PAFC 200-kWel-Brennstoffzelle in Birsfelden** [10] teilunterstützte Anlage wurde auf dem Areal der Schulanlage Kirchmatt direkt neben dem Schulgebäude aussen aufgestellt. Der Anlagestandort ist von Behörden, Passanten und Anwohnern gut akzeptiert. Einzig die durch die Ventilatoren der Brennstoffzelle verursachten Schallemissionen führten zu einzelnen Beanstandungen. Mit der Nachrüstung von Schalldämpfern wurde das Problem behoben. Die insbesondere bei feuchtem Wetter sichtbare Dampfschwade führte zu keinen Beanstandungen. Im Jahr 2001 produzierte die Anlage während 7'850 Betriebsstunden 1'270 MWh Strom, was einer mittleren Last von 162 kW entspricht. Der elektrische Wirkungsgrad lag bei durchschnittlich 39,8%. Die genutzte Wärme betrug 918 MWh, womit ein Gesamtwirkungsgrad von 69% erreicht wurde. Im Mai wurde auf Garantie eine Nachbesserung der Isolation im Reformer durchgeführt. Im September erfolgte eine Anlagenabschaltung wegen einem defekten Spannungswandler. Die Anlage wurde bis zur bereits terminierten 8'000 Stundenwartung während 3 Wochen ausser Betrieb gelassen. Der elektrische Wirkungsgrad erfüllt die Zielsetzung (40%). Die Nutzung der thermischen Energie ist wegen zu hohen Rücklauftemperaturen im Fernwärmenetz (> 50 °C) ungenügend. Verbesserungen sind zum Teil realisiert

worden. Im Frühjahr und Sommer lief die Anlage auf reduzierter und von Oktober bis Dezember rund um die Uhr auf voller Last. Die Betriebssicherheit und Verfügbarkeit der Anlage im Jahr



2001 kann als sehr gut bezeichnet werden.

Figur 7: Aufbau Biogas-Feldtestsystem. (Bildquelle Sulzer)

Das Brennstoffzellenheizgerät *HXS 1000* der Firma *Sulzer HEXIS* ist eine Anlage, die aus Erdgas den elektrischen und wärmetechnischen Grundbedarf eines Einfamilienhauses decken kann. Die zugeführte Energie in Form von Erdgas wird elektrochemisch in Strom umgewandelt, die anfallende Restwärme wird zu Heizzwecken und als Brauchwarmwasser genutzt. Da diese Technologie jedoch grundlegend neu (auf dem Markt) ist, fehlten bisher Normen und Prüfverfahren, die für die Zulassung eines solchen Geräts herbeigezogen werden können.

Im Projekt **Zertifizierung einer HEXIS-Brennstoffzelle nach EN-Standard** [11] wurde aufgezeigt, wie solch eine neue Technologie zum Markt zugelassen wird, wie die entsprechenden Normen geschaffen werden und welche Probleme dabei zu umschiffen sind. Am Ende des Projekts wird eine CE Zertifizierung des Brennstoffzellenheizgerät HSX1000 für den europäischen Markt angestrebt. Die Anforderungen für die Zulassung von Brennstoffzellensystemen in der Haustechnik wurden für den Raum Deutschland ab Mitte 1999 in Zusammenarbeit von Zulassungsbehörden, Prüfstellen und Geräteherstellern erarbeitet. Resultat der Arbeiten ist die Vorläufige Prüfgrundlage (VP) 119 *Brennstoffzellen-Gasgeräte bis 70 kW* vom Oktober 2000. In Deutschland dient die VP 119 den akkreditierten Prüfstellen als Basis für die Prüfung von derartigen Geräten und zur Erteilung des EU-Konformitätszeichens. Dieses Zeichen berechtigt im Prinzip zum freien Marktzugang in Europa und ist eine wichtige Voraussetzung für die geplante europaweite Markteinführung der HEXIS-Zelle.

Mit ihrem KTI-Projekt [13] und dem gegen Ende 2001 gestarteten Projekt **Bandherstellverfahren ASE-SOFC für Brennstoffzellen** [12] wirkt die Start-Up Firma HTceramix SA aktiv im Bereich der SOFC mit. Die Firma will die an der ETH-Lausanne entwickelte kostengünstige Fabrikationsmethode für Zellmembranen industriell umzusetzen. Ein Massenprodukt muss nicht nur im Labor die geforderten Leistungen erbringen, sondern auch die geometrischen wie elektrochemischen Spezifikationen der zu beliefernden Unternehmen respektieren. Zum Zweck einer Standortbestimmung werden deshalb 3 Batches unter industriellen Bedingungen getestet. Die Resultate werden fortlaufend in die Produktentwicklung integriert. Seit Projektstart (November 2001) wurde ein erster Batch (5 Zellen) getestet.

Die Fachhochschulen werden in Zukunft eine stärkere Rolle bei der Umsetzung der Brennstoffzellentechnologie einnehmen. Brennstoffzellensysteme benötigen zu ihrer Funktion neben dem Zellenstapel eine Reihe weiterer Hilfskomponenten wie ein Frischluftverdichter und –Befeuchter,

Stapelkühlung- und Wärmeabfuhrsysteme, Elektronik zur Leistungsoptimierung des Gesamtsystems. Hier können die Fachhochschulen ihre Kompetenz für Systemfragen und ihr Beziehungsnetz zur Privatwirtschaft einbringen und eine wichtige Brückenfunktion beim Transfer des Hochschulwissens in die Praxis übernehmen. Mit dieser Zielsetzung hat das BFE mit den Projekten [7, 8] die Integration der Fachhochschulen *Biel* und *Yverdon* in das Brennstoffzellenprogramm verstärkt. Stärker ist jedoch die Förderung seitens der KTI mit folgenden KTI-Projekten:

An der Fachhochschule Biel wird ein dynamischer Teststand für PEM-FC für mobile und stationäre Anwendungen im Leistungsbereich bis 10 kW [14] aufgebaut. In einer ersten Phase wurde das Konzept für die Testanlage erstellt und die notwendigen Komponenten bestimmt. Die Auslegung der diversen Systeme zur Bereitstellung der Gase in einem definierten Zustand erwies sich als sehr komplex. Dabei konnte von den Erfahrungen des PSI profitiert werden. Insbesondere konnte der Leistungsbereich erhöht und das dynamische Verhalten der Anlage verbessert werden. Damit genügt nun das Konzept den hohen Anforderungen für zuverlässige Tests von Brennstoffzellen sowohl im statischen wie dynamischen Betrieb. Zur Zeit befindet sich der Prüfstand im Aufbau und sollte im kommenden Frühjahr in Betrieb genommen werden. Das elektrische Verhalten von PEM-FC wird dann bei verschiedenen Betriebsbedingungen erfasst werden können.

Die Zürcher Hochschule Winterthur (ZHW) unterstützt den Einsatz von SULZER HEXIS-Zellen mit den KTI-Projekten: **Innovative Methoden zur Steuerung und Analyse von HEXIS-WKK-Systemen** [15], **Aufbereitung von herkömmlichen und biologischen Brennstoffen für Hochtemperaturbrennstoffzellen** [16] und **Ausbau eines Simulationstools zur Entwicklung von Solid Oxide-Brennstoffzellen** [17]. Damit ist der systematische Kompetenzaufbau der ZHW auf dem Gebiet der SOFC weiter ausgebaut worden.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Bei der PEM-FC ist der im Jahr 2000 gestartete Kompetenzaufbau und die Vernetzung zwischen den Projekten des PSI und den Fachhochschulen konsequent weiter verfolgt worden. In diesem

Sinne ist auch das Forschungs- und Umsetzungsprogramm **H₂/Methanol-Brennstoffzellen 2000 – 2003** [19] zuhanden der CORE ausgearbeitet worden. Hingegen ist für den

Bereich Erdgas-Brennstoffzellen ein detailliertes Forschungs- und Umsetzungsprogramm für die Jahre 2000 – 2003 erst ansatzweise vorhanden.

Die wesentlichen Programmziele sind sowohl bei den SOFC als auch bei den PEM-FC und -Systemen erreicht worden. Auch in allen Projekten sind die angestrebten Ziele erreicht worden. Zudem haben die PSI-Aktivitäten und deren Vernetzung mit den Fachhochschulen und KMU neuen Schwung erhalten.

Im Jahr 2002 werden die laufenden P+D-Projekte im Vordergrund stehen. Vor allem soll per Anfang 2002 der im BRESA-Projekt entwickelte, mit einer PSI-Brennstoffzelle und Supercaps ausgerüstete Personenwagen der breiten Öffentlichkeit vorgestellt werden. Ebenso sollte sich das mit PSI-Brennstoffzellen bestückte Boot Hydroxy 2000 weiter konkretisieren.

Das seitens der CORE geforderte Zusammenlegen der beiden Teilprogramme kann im Jahr

2002 umgesetzt werden. Ziel für das gemeinsame Programm wird u. a. ein einheitlicher Qualitätsmassstab sein, der bei der Vergabe neuer BFE-Projekte konsequent verfolgt werden soll.

Arbeitsprogramm 2002:

- Fortsetzung der Forschungsarbeiten gemäss Energieforschungskonzept
- Möglichst frühzeitiger Start des PowerPac-Projekts
- Kritisches Bewerten und, falls nötig Neuorientierung der F+E-Aktivitäten im SOFC-Bereich
- Vernetzen von F+E PEM-FC- und SOFC-Aktivitäten, z. B. im Bereich der Modellierung
- kritisches Sichten und Bewerten aller IEA-Beteiligungen
- Internet-Auftritt des Programms Brennstoffzellen
- vermehrtes Publizieren von Artikeln für das breite Publikum (z.B. in den *ENET-News*).

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden

- [1] G. Scherer et. al (guenther.scherer@psi.ch), PSI-Villigen, **Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H₂ oder Methanol als Brennstoff** (JB)
- [2] B. Gut et al., EMPA-Dübendorf, A. McEvoy et al: EPF-Lausanne, L. Gauckler et al.: ETH-Zürich: (thomas.graule@empa.ch) Konsortium **Anode supported PEN for SOFC** (JB)
- [3] K. Honegger (kaspar.honegger@sulzer.ch), Winterthur, **SOFC-APU Advanced Fuel Cell Stack** (JB).
- [4] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENNZ Basel, **IEA Task 12 Mandat ExCo Brennstoffzellen** (JB).

Liste der P+D-Projekte

- [5] P. Dietrich et. al. (philipp.dietrich@psi.ch), PSI-Villigen: **Personenwagen mit Brennstoffzellen- und Supercap-Antrieb – ein Beitrag Richtung nachhaltiger Mobilität, demonstriert in einem Familienauto** (JB).
- [6] M. Ruge (ruge@imes.mavt.ethz.ch) et. al. ETH-Zürich / PSI-Villigen, **Vorprojekt zur Bildung eines Brennstoffzellennetzwerkes in der Schweiz (PowerPac)** (SB).
- [7] J. Affolter (affolter@eivd.ch) EIVD Yverdon, **Pile PEM pour Hydroxy 2000**.
- [8] J. Affolter (affolter@eivd.ch), EIVD Yverdon, **Intégration des systèmes pour Hydroxy 2000**

- [9] M. Jenne (markus.jenne@sulzer.ch) SULZER HEXIS AG Winterthur, Y. Membrez EREP SA Aclens, J. Vanherle EPF-Lausanne: **Pilot-Anlage Biogas - HEXIS** (JB).
- [10] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch) THOMA+RENZ Basel: **Nahwärmeversorgung mit Brennstoffzelle Typ ONSI PC 25C in Birsfelden**, (JB).
- [11] Ph. Holoch (philipp.holoch@sulzer.com) SULZER HEXIS AG Winterthur: **Zertifizierung einer Brennstoffzelle nach EN-Standard**, (JB).
- [12] O. Bucheli (olivier.bucheli@htceramix.ch) Htceramix SA, Science Park PSE-C, Lausanne, **Bandherstellverfahren ASE-SOFC für Brennstoffzellen**, (JB).

Referenzen

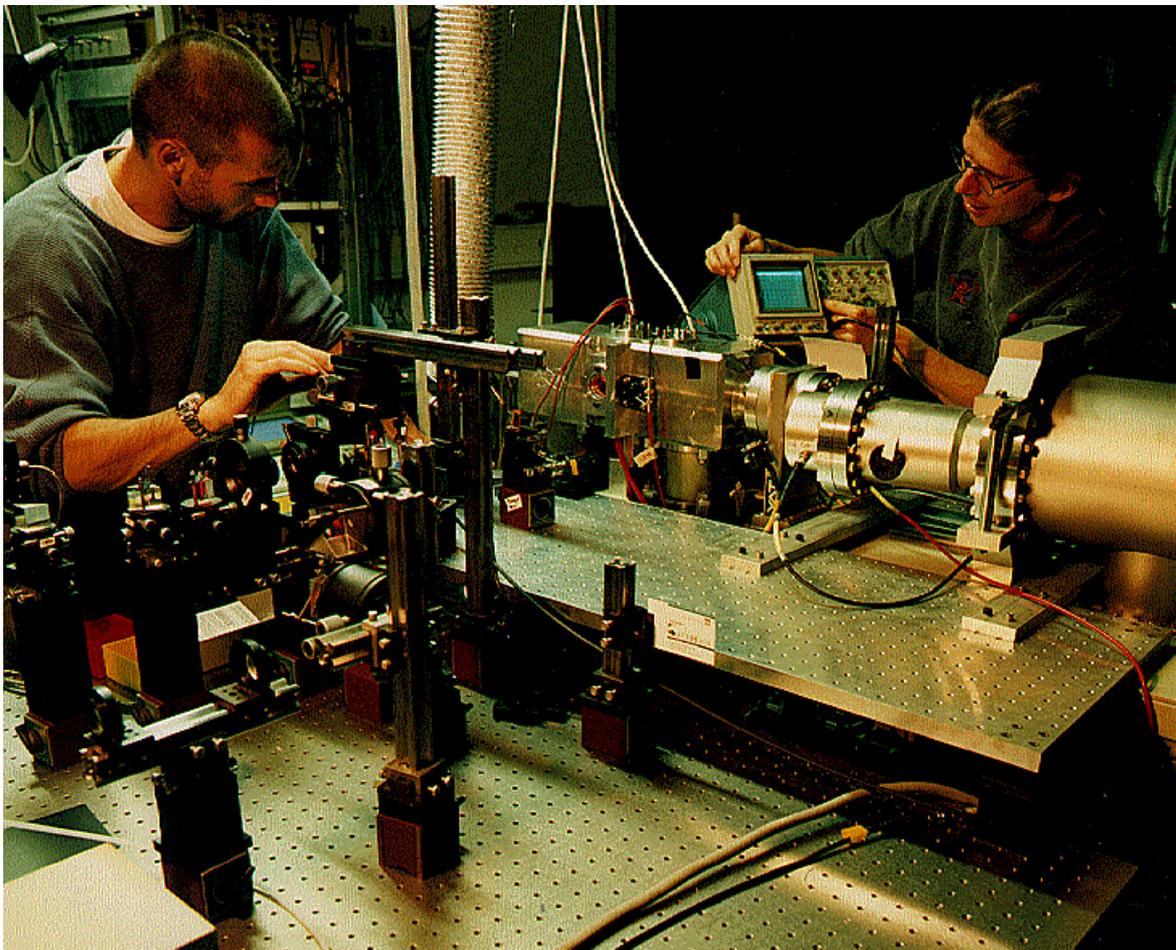
- [13] D. Favrat (daniel.favrat@epfl.ch) ETH-Lausanne, **Développement d'un système de piles à combustibles de type SOFC basé sur la technologie des couches minces d'électrolyte sur support anode**.
- [14] M. Höckel (Hkm@hta-bi.bfh.ch) FH Biel, **Bau eines dynamischen Teststands für PEM-Brennstoffzellen für mobile und stationäre Anwendungen im Leistungsbereich bis 10 kW**.
- [15] H. Juzi (heinz.juzi@zhwin.ch) Zürcher Hochschule, Winterthur: **Innovative Methoden zur Steuerung und Analyse von HEXIS-WKK-Systemen**.
- [16] Th. Spielmann (thomas.spielmann@zhwin.ch) Zürcher Hochschule, Winterthur: **Aufbereitung von herkömmlichen und biologischen Brennstoffen für Hochtemperaturbrennstoffzellen**.
- [17] M. Roos, (markus.roos@zhwin.ch) Zürcher Hochschule, Winterthur: **Ausbau eines Simulationstools zur Entwicklung von Solid Oxide-Brennstoffzellen**.
- [18] A. Hintermann (alphons.hintermann@bfe.admin.ch) M. Rügsegger: **Das BFE nährt keine Illusionen**, aus ENET-News, Juni 2001, Seiten 22 – 23.
- [19] A. Hintermann (alphons.hintermann@bfe.admin.ch), **H₂/Methanol-Brennstoffzellen**, Forschungs- und Umsetzungsprogramm 2000 - 2003, Dezember 2001.
- [20] D. Schmid (schmid@imes.mavt.ethz.ch) IMES, ETH-Zürich: **Newsletter PowerPac**, Nr. 1, September 2001.

FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2001

Alphons Hintermann

alphons.hintermann@bfe.admin.ch



Optische Instrumentierung der Hochtemperaturdruckzelle am PSI

Messungen von Partikel- und Verbrennungskomponenten (Russpartikel, Radikalkonzentrationen) der Brennstoffpyrolyse oder die Visualisierung der Brennstrahlzündung an der Hochtemperaturdruckzelle benötigen aufwändige optische Werkzeuge.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Nach wie vor decken wir durch Verbrennen fossiler Energieträger einen Grossteil unseres Energiebedarfs. Die **Verbesserung der Energieeffizienz von technischen Verbrennungssystemen** trägt zur Ressourcenschonung sowohl fossiler als auch nachhaltig erzeugter Brennstoffe bei und steht daher im Vordergrund des Programms. Gleichzeitig fordert der Gesetzgeber immer tiefere Emissionen von Verbrennungssystemen. Künftige Systeme dürfen zwar mehr kosten, in der Energieeffizienz dürfen aber keine oder höchstens nur sehr geringe Abstriche gemacht werden, um die **CO₂-Problematik** nicht zusätzlich zu verschärfen. Um diese ingenieurmässige Gratwanderung zu schaffen, müssen die Grundlagen moderner Verbrennungstechnologien erarbeitet, verstanden und anschliessend in käufliche Produkte umgesetzt werden. Dies ist eine höchst anspruchsvolle Aufgabe. Wir können hierzu nur dann beitragen, wenn unsere Forscher stets an vorderster Front mithalten können.

Seit 1988 werden die **Grundlagen der Verbrennungsprozesse** stationärer atmosphärischer Feuerungen (inkl. Abfallverbrennungsanlagen), Gasturbinen sowie der motorischen Verbrennung erforscht und mit Mitteln der öffentlichen Hand gefördert. Das im Programm **Feuerung und Verbrennung** [26] 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 konzentriert. Es liegt im Zwischengebiet der langfristigen Hochschulforschung (Zeithorizont: 10 Jahre) und der Industrieforschung (Zeithorizont: 1-2 Jahre). Das erarbeitete Grundlagenwissen hat eine wichtige Vorbereitungsfunktion für spätere P+D-Projekte. Forschungsschwerpunkte sind **numerische Simulation** auf der theoretischen und **optische Messmethoden** auf der experimentellen Seite. Weitere Schwerpunkte bilden die **Schadstoffreduktion** mit optimaler **Energieeffizienz** und die **Schadstoffanalytik**.

Markterfolge zu erzielen und mit **neuen, marktfähigen Produkten aufzuwarten**, ist Hauptziel der P+D-Aktivitäten, die vernetzt zwischen den Hochschul-, Fachhochschul und Industriepartnern definiert und ausgearbeitet werden. In den letzten Jahren wurde der Anteil der stationären Verbrennungsforschung zurückgefahren, da traditionelle heimische Brennerfirmen von ausländischen Konkurrenten übernommen wurden.

Die in den Jahren 1998/99 mit Unterstützung des BFE entwickelten und anschliessend auf dem Markt erschienenen Erdgas *YGNIS-VARINO*-Brenner setzten damals neue Massstäbe bezüglich tiefen Schadstoffwerten und hoher Energieeffizienz. Heute sind über 2500 *VARINO*-Brenner (Leistungsmodulation 60-300 kW) und über 500 *VARINO-GRANDE* Brenner (Leistungsmodulation 350-600 kW) bei Kunden installiert. Interessant ist, dass ca. 80% dieser Brenner ins Ausland, vorab nach Italien, verkauft wurden. Grund: in Italien ist der Gaspreis wesentlich höher und daher ist der Mehrpreis des *VARINO*-Brenners schneller amortisiert als bei uns. Ausserdem wurde in der katalytischen Verbrennung der Sprung von der Grundlagenforschung am PSI zur Anwendung beim Industriepartner *Alstom Power* in Baden durch ein neues KTI-Projekt **Modellierung und Auslagerung eines CO₂- und NO_x-freien Brenners für ALSTOM Power Gasturbinen** (NO_x-Emissionen unter 3 ppm) [21] sowie durch das EU-Projekt **Advanced Zero Emission Power Plant** [26] geschafft.

Im Bereich der instationären (motorischen) Verbrennung arbeitet das LVV seit langem erfolgreich mit verschiedenen nationalen und ausländischen Industrie- und Hochschulpartnern zusammen: Zur Zeit werden die im off-road-Bereich stark vertretenen *LIEBHERR*-Dieselmotoren auf Leistungserhöhung und Erfüllung der zukünftigen EURO III- und EURO IV-Emissionsnormen getrimmt. Die Einführung dieser Technologie in die Serie ist überlebenswichtig für die Motorenherstellung der Firma *LIEBHERR* und wird innerhalb der nächsten 2 Jahre angestrebt. Dazu ist aber die Fortsetzung ihrer engen Zusammenarbeit mit dem LVV unabdingbar. Auf dem Gebiet der Grossdieselmotoren beschloss die *Wärtsilä NSD, Winterthur*, die Konsortiumsaktivitäten zusammen mit dem LVV für 2 Jahre fortzusetzen, um *Computational Reactive Fluid Dynamics* (CRFD) verstärkt als Werkzeug in die Entwicklung neuer Produktgenerationen einzusetzen.

Programmschwerpunkte 2001 waren die **Evaluation des Programms** durch eine internationale Expertengruppe, das **Zero-Emission Seminar** vom 15. Juni 2001 sowie die verstärkte **Integration der Fachhochschulen ins Programm**. Hauptziel des Programms ist das Erarbeiten von wissenschaftlich hochstehenden und international anerkannten Forschungsergebnissen mit einem Umsetzungshorizont von 1 – 5 Jahren.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

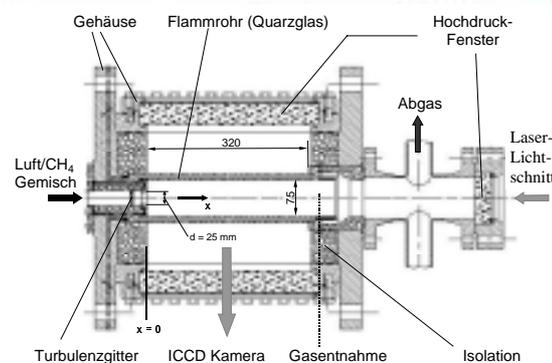
GRUNDLAGEN DER VERBRENNUNG

Das Potenzial und die Möglichkeiten der *Direkten Numerischen Simulation* (DNS) zur Beschreibung der fundamentalen Effekte der Wechselwirkung zwischen der turbulenten Strömung und der chemischen Kinetik werden im Projekt **turbulente, chemisch reaktive Strömung in Motoren Brennräumen** [1] für einen Gegenstrombrenner mit Wasserstoff als Brennstoff unter Einbezug unterschiedlicher Randbedingungen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die *edge-flame* einer neuen, vierten numerischen Lösung des Problems entspricht. Inzwischen wurde herausgefunden, dass für Reynoldszahlen zwischen 320 und 650 die *edge-Flamme* gleichzeitig mit einer Diffusionsflamme koexistiert [27]. Damit ist die Basis geschaffen, entsprechende Experimente am PSI durchzuführen [3]. Da gezeigt werden konnte, dass *edge-Flammen* eine wichtige Rolle bei Auslösch- und Wiederzündvorgängen spielen, haben diese Phänomene direkte Auswirkungen auf das Verständnis und die Modellierung von turbulenten Verbrennungsprozessen.

Im Projekt **Tiefemperaturverbrennung bei hohen Drücken** [2] wurde experimentell und numerisch in einer laminaren Kanalströmung der Zündpunkt der Gasphase von vorgemischten, brennstoffmageren Methan-Luft-Gemischen über Platin unter Hochdruckbedingungen bis zu 10 bar untersucht. Dabei wurden die Experimente in einem optisch zugänglichen, katalytischen, kanalförmigen Reaktor durchgeführt, der aus zwei Platin-beschichteten Platten mit einer Länge von 300mm und einer Höhe von 7mm besteht. Mit Hilfe der planaren, Laser-induzierten Fluoreszenz (PLIF) wurde durch das OH-Radikal die mögliche Zündung in der Gasphase aufgenommen. Es hat sich gezeigt, dass für Drücke bis zu 6 bar der gemessene und berechnete (Deutschmann/Warnatz) Winkel des Flammenschweifes und die OH-Konzentrationen gut übereinstimmen, während der Zündpunkt der Gasphase eine relative Abweichung unter 10% aufweist. Auf der anderen Seite zündet bei höheren Drücken als 8 bar die Gasphase in den numerischen Berechnungen wesentlich vor dem experimentell gemessenen Zündpunkt (>25%). Die Kombination der Reaktionsmechanismen *Deutschmann/GRI-3.0* führte im gesamten Druckbereich auf wesentlich frühere Zündpunkte in der Gasphase (ca. 55%-65%). Die Ergebnisse dieses Projekts

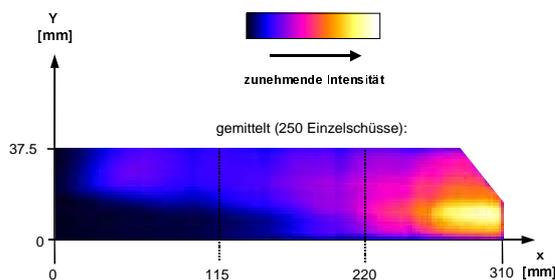
werden direkt in das neu gestartete KTI-Projekt **Modellierung und Auslegung eines CO₂ und NO_x freien Brenners für ALSTOM Power Turbinen** [21] mit dem Gasaturbinenhersteller *Alstom Power* einfließen. Ziel des Projekts ist ein durch Labor- und Pilotexperimente verifiziertes Modell zur Auslegung von katalytischen Brennkammern für die Entwicklung einer neuen Generationen von Gasturbinen zur emissionsfreien Energieerzeugung: Verbrennung von Erdgas in Luft mit NO_x-Emissionen unter 3 ppm, wobei Methan mit durch Verbrennungsgase hochverdünntem Sauerstoff umgesetzt wird, was eine einfache Abtrennung des gebildeten CO₂ ermöglicht (*Zero Emission Power*).

Ziel des Projekts **Struktur turbulenter Vormischflammen unter Hochdruck** [3] ist die Untersuchung des Einflusses der Turbulenz auf die Struktur der Flammenfront und damit auf die Stickoxidbildung bei turbulenten, mageren Vormischflammen. Im März 2001 konnte der im Vorjahr begonnene Aufbau des Hochdruck-Verbrennungsprüfstands (Fig.1) erfolgreich abgeschlossen werden.

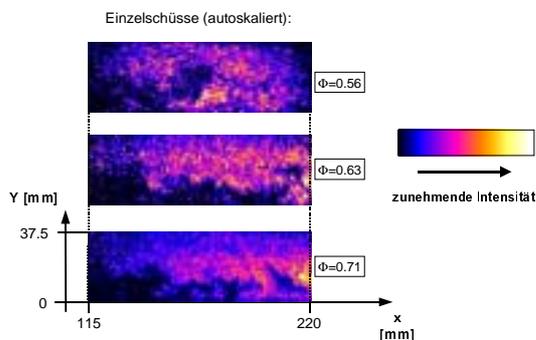


Figur 1: Hochdruck-Verbrennungsprüfstand; Aussenansicht (oben) und Horizontalschnitt (unten) (Quelle: PSI)

In der anschliessenden Messkampagne zur Bestimmung der mittleren Flammenposition und der Flammenstruktur mit Hilfe der Laser-induzierten Fluoreszenz (LIF) anhand des OH-Radikals wurden die charakteristischen Kenngrößen von turbulenten Vormischflammen (turbulente Reynoldszahl, Damköhlerzahl und Karlovitzzahl) systematisch variiert. Es konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der laminaren Flammengeschwindigkeit auf die turbulente Flammengeschwindigkeit geringer ist als erwartet.



Figur 2: Gemittelte Fluoreszenzintensität von NO bei $\Phi = 0.71$ (673 K, 1 bar, 60 m/s).



Figur 3: NO-LIF Einzelschussaufnahmen für verschiedene Äquivalenzverhältnisse (67 K, 1 bar, 60 m/s).

NO-LIF Messungen zur Bestimmung der NO Emission (Fig. 2, 3) konnten auch bei höheren Drücken durchgeführt werden. Die mit Hilfe von konventioneller Abgasanalyse bestimmten NO-Konzentrationen stimmen gut mit den Ergebnissen aus den NO-LIF Messungen überein.

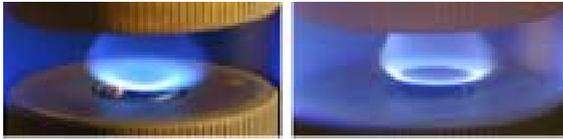
OPTISCHE MESSMETHODEN

Im Hinblick auf eine erfolgreiche Einführung alternativer und synthetischer Brennstoffe befasst sich eine PSI-Forschergruppe im Projekt **Verbrennungsreaktionen in Gegenwart sau-**

erstoffhaltiger Brennstoffe [4] mit den bisher weitgehend unbekanntenen Daten zur Verbrennungsschemie von Methylal und Butylal. Allgemeines Ziel dieses Vorhabens ist es, die Wirkungsweise und Bedeutung von strategisch ausgewählten Molekülen auf das Zündverhalten und die Russbildung im kompressionsgezündeten Verbrennungsmotor zu untersuchen. Die im folgenden beschriebenen Arbeiten behandeln den Wasserstoffverlust eines Ethylradikals, eine Reaktion, die während des Zündprozesses eines Brennstoff-Luft-Gemisches von grosser Wichtigkeit ist. Weitere Arbeiten betreffen die Weiterentwicklung einer Messmethode, die erlaubt dynamische Prozesse in Molekülen zu untersuchen. Die Projektarbeit ergab wichtige Hinweise auf die Mechanismen der pyrolytischen Brennstoffaufspaltung, insbesondere von Acetalen. Quantitative Ergebnisse müssen jedoch noch erarbeitet werden. Da die Ionen der Azetale meistens instabil sind, führen massenspektrometrische Experimente nicht zu eindeutigen Ergebnissen. Für die Weiterführung der Arbeiten muss mit einem grösseren Zeitaufwand für die Entwicklung von optischen Spektroskopien zur Ergänzung der Massenspektrometrie gerechnet werden. Da die Azetale im sichtbaren Spektralbereich und im nahen Ultraviolett keine Absorptionen zeigen, müssen Methoden im Vakuumultraviolett (VUV) entwickelt werden. Dazu bietet sich das am PSI neu errichtete Synchrotron SLS an. Mit dem SLS-Team wird deshalb an der Einrichtung einer entsprechenden SLS-Strahllinie gearbeitet.

Die Modellierung der komplexen Verbrennungsvorgänge erfordert eine professionelle experimentelle Verifikation der berechneten Kenngrößen. Die Zielsetzungen des Projekts **Quantitative Laser-Induced Fluorescence in Combustion** [5] sind einerseits die Weiterentwicklung des LIF-Verfahrens zu einer quantitativen Technik zwecks Validierung von numerischen Simulationen und der dabei verwendeten Modelle und andererseits um quantitative experimentelle Resultate auch in Fällen zu erhalten, die der numerischen Simulation schwer zugänglich sind. In einem ersten Teil des Projekts wird LIF zur Bestimmung der Flammenzonen und der lokalen Brennstoffkonzentration in einem Diffusions-Gegenstrombrenner angewendet. Dabei konnte die numerisch gefundene *Edge-Flamme* im Projekt [1] auch experimentell nachgewiesen werden (Fig. 4). Der zweite Teil des Projekts, der erst 2002 in Angriff genommen wird, umfasst LIF-Experimente zur Messung der lokalen Konzen-

tration von verdampftem flüssigem Brennstoff in industriellen Gasturbinen. Dank solcher Messungen wird es möglich sein, tiefere NO_x-Werte und bessere Wirkungsgrade in künftigen Gasturbinen zu erzielen.



Figur 4: Experimenteller Nachweis zweier Flammenformen in einem Brenner mit Gegenstrom-Geometrie: links die Diffusionsflamme und rechts die Edge-Flamme. (Quelle: PSI)

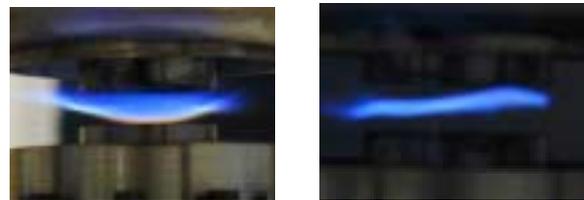
NUMERISCHE SIMULATION VON VERBRENNUNGSVORGÄNGEN

Bei der Entwicklung und dem Bau von Verbrennungsanlagen mit tieferen Schadstoffwerten und möglichst hoher Energieeffizienz gewinnt der Einsatz numerischer Methoden zunehmend an Bedeutung. Durch gezielte Untersuchungen der Verbrennungsprozesse sind Verbesserungen sowohl der Effizienz bei der Brennstoffausnutzung als auch der Schadstoffreduktion bei der Auslegung von Anlagen möglich. Für einen sinnvollen Einsatz der entwickelten numerischen Werkzeuge ist eine Validierung durch Experimente eine Grundvoraussetzung.

Im Projekt **Schadstoffreduktion durch Teilvormischung** [6] werden Teilvormischsysteme numerisch betrachtet und dabei laminare und turbulente Teilvormischflammen detailliert untersucht. Die teilvorgemischte Verbrennung besitzt ein ähnlich grosses Potenzial für die Reduktion der NO_x-Emissionen wie die voll vorgemischte Verbrennung. Teilvormischung besitzt aber den grossen Vorteil, dass keine zündbaren Gemische ausserhalb des Brennraumes auftreten. Es konnte gezeigt werden, dass im Vergleich zur voll vorgemischten Verbrennung der Mechanismus der NO_x-Reduktion vollständig anders verläuft, indem eine flammeninterne gestufte Verbrennung induziert wird. In der Dissertation [28] wurde das transiente Flamelet Modell von Ferreira durch eine zusätzliche Koordinatentransformation so modifiziert, dass die *Flamelet Libraries* der reinen Diffusionsverbrennung in erster Näherung auch auf den teilvorgemischten Fall angewendet werden können.

Experimentell wird das Projekt [6] im Vorhaben **Experiment turbulente Gegenstromflamme**

[7] unterstützt, um möglichst genaue Informationen zur Flammenstruktur in der Teil-Vormischverbrennung zu liefern. Vormischverbrennung ist zwar ein Konzept für die Reduktion von Stickoxiden, stellt aber ein Sicherheitsproblem dar, da sich ein zündfähiges Gemisch in Bereichen befindet, wo keine Verbrennung stattfinden sollte: Teilvormischung ist ein Kompromiss, bei dem die Vorteile der vorgemischten Verbrennung ohne das Sicherheitsproblem genutzt werden können. Solche Grundlagen sind für die Brennerindustrie von Bedeutung. Die Installation des LDV-Messsystems wurde Anfang 2001 abgeschlossen und erste Messungen am Delft-Brenner gemacht (Fig.5).



Figur 5: laminare (links) und turbulente Gegenstromflamme (rechts)

Modellierung und Messung turbulenter Verbrennungsvorgänge unter Berücksichtigung einer detaillierten Verbrennungsschemie sind grosse Herausforderungen an den Ingenieur. In der Realität findet die Verbrennung in turbulenten Diffusionsflammen in äusserst komplexen Strukturen statt, welche bei der experimentellen Erforschung bis heute nur teilweise erfasst und bei der numerischen Simulation von Verbrennungsvorgängen nur ungenügend berücksichtigt sind. Ziel des Projekts **Struktur turbulenter Diffusionsflammen** [8] ist es, eine verbesserte Simulationsmethode zu entwickeln, die gleichzeitig die Aspekte einer detaillierten Verbrennungsschemie als auch den Umstand, dass die Verbrennung in lokalen laminaren Flammenstrukturen stattfindet, berücksichtigen kann. Dazu sollen die Vorteile des PDF-Transportgleichungs-Modells mit denjenigen des transienten Laminar-Flamelet-Modells in einem kombinierten Modell vereinigt werden. Da diese Simulationsrechnungen sehr zeitintensiv sind, werden zunächst einfache Geometrien behandelt. Gegenstrom-Diffusionsflammen sind ein gut geeignetes und international aktuelles Forschungsobjekt.

Das Projekt **Large Eddy-Simulation (LES) für turbulente, nicht vorgemischte Verbrennung** [9] ist die Fortsetzung einer früheren Zusammenarbeit des LVV, des Seminars für ange-

wandte Mathematik (SAM) der ETH-Zürich und des Lehrstuhls für technische Simulation der Universität Heidelberg unter Einbezug des ETH-Instituts für Fluidodynamik (IFD). Das Ziel ist, ein neues LES-Modell für eine turbulente, nicht vorgemischte Verbrennung, basierend auf einem unsteady *Flamelet-approach* zu entwickeln. Die Interdisziplinarität und die enge Zusammenarbeit von vier ETH-Instituten ist ein wichtiger Aspekt. Zwei LES-Modelle sollen miteinander verglichen werden: Das LVV und das IFD verwenden die approximative Dekonvolutionsmethode und das SAM mit dem LTNT ein früheres, am SAM entwickeltes Konzept. Die numerischen Aussagen beider Modelle werden am LTNT mit den experimentellen Resultaten im turbulenten Gegenstrombrenner validiert.

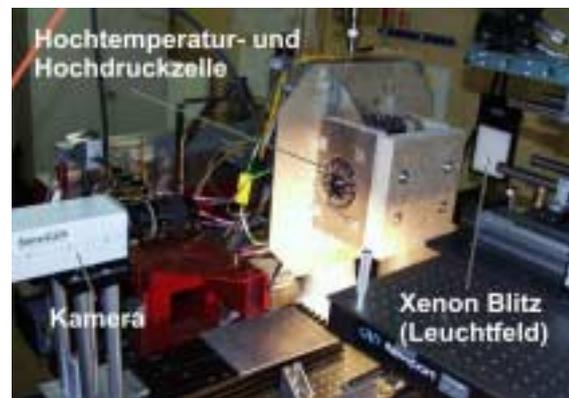
SCHADSTOFFREDUKTION UND -ASPEKTE

Beim Diesel- wie auch beim Ottomotor liegen noch Verbesserungspotenziale sowohl beim Wirkungsgrad als auch bei den Schadstoffen brach. Die Stichworte Hochdruckverbrennung und *zündungsfreie Einspritzsysteme* sind hochaktuelle Forschungs- und Entwicklungsthemen aller führenden Motorenhersteller. In diesen Themenkreisen sind unsere Forscher weltweit an vorderster Front dabei. In enger Zusammenarbeit haben das PSI und das LVV zwei Hochtemperaturdruckzellen (HTDZ) konzipiert, mit denen der Dieselzyklus bei konstantem Volumen untersucht werden kann.

Mit diesen HTDZ können das PSI sowie das LVV die Verbrennungsmechanismen wie Strahlausbreitung und -vormischung in einem Diesel-Motorzyklus störungsfreier untersuchen als am Experimentiermotor, bei dem der optische Zugang geometrisch stark eingeschränkt ist und die Fenster durch die im Motor notwendigen Schmiermittel nach wenigen Zyklen degradiert werden. Im Gegensatz zu einem Diesel-Motor bleibt in der HTDZ das Volumen in dem sich die Flamme entwickelt bei den Versuchen konstant (keine Kolbenbewegung). Realitätsnahe Messungen sind daher nur für eine kurze Zeit nach Einspritzbeginn möglich. Für Parameterstudien und Validierung der Simulationscodes sind daher spezielle Verbrennungszellen wie die HTDZ (<http://rag.web.psi.ch/index.html>) viel besser geeignet

Die laufenden Experimente im neu gestarteten Projekt *Investigation of Spray Combustion in Constant Volume Combustion Cell* [10] gelten

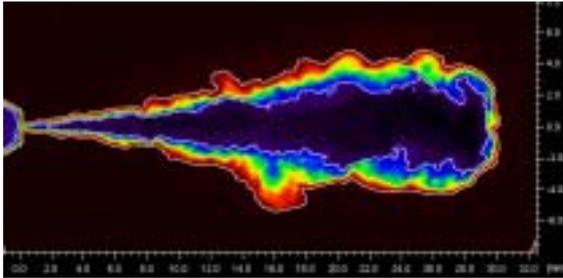
der Charakterisierung der Sprayausbreitung im Fall einer Einspritzung bei hohem Druck (Common Rail Betrieb), der Bestimmung der Zündverzögerungen und der Typisierung der entstehenden Flammen. Ausser dem Ziel, den Dieselzyklus grundsätzlich zu erfassen, werden auch Messserien für Brennstoffe, die sauerstoffhaltige Verbindung enthalten, durchgeführt. Diese neuartigen Brennstoffmischungen können voraussichtlich die Russproduktion verringern, ohne den Stickoxidausstoß zu vergrössern. Die Ziele dieses Vorhabens sind: die Mechanismen in Gegenwart von Sauerstoff im Brennstoffstrom zu beschreiben sowie die dazu notwendige Messmethodik zu verbessern. Dieses Projekt liefert komplementäre Messungen und ergänzt die Forschungsvorhaben, die das LVV und die Universität Nimwegen an adaptierten Motoren durchführen.



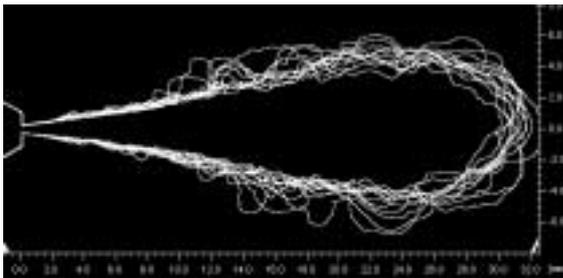
Figur 6: Versuchsaufbau für Schattenbilder

Im Projekt *Modellierung und Validierung von reaktiven, instationären 2-Phasenströmungen* [11] wurden Arbeiten auf zwei Gebieten der mehrphasigen Diffusionsverbrennung (wie sie für Dieselmotoren typisch ist) durchgeführt. Einerseits wurde der Einfluss von sauerstoffhaltigen Brennstoffen (Ethan, Dimethylether und Methylal) auf die Russbildung in einer Ethylen-Diffusionsflamme quantitativ bestimmt. Dabei konnte klar gezeigt werden, dass das Russreduktionspotential in der Reihenfolge Methylal, DME und Ethan abnimmt. Zur Visualisierung der Einspritzstrahlen (Titelbild und Fig. 6) kommen verschiedene, zeitlich hochauflösende Messmethoden zum Einsatz und erlauben Messungen von Tropfengrößen und -geschwindigkeiten an ausgesuchten Punkten im Einspritzstrahl. Bei den Spray-Untersuchungen wurden Schattenbilder (Fig. 7, 8) und planare Aufnahmen der Mie-Streuung der flüssigen Phase unter verschiedenen motorrelevanten Bedingungen gewonnen.

Erste PDA-Messungen zur lokalen Charakterisierung werden ebenfalls gestartet. Bei der Russminderung mit O₂-haltigen Kraftstoffzusätzen wurden nebst qualitativen Aufnahmen in der HTDZ vorwiegend LII-Messungen an einem Diffusionsbrenner unter kontrollierten Bedingungen gemacht, welche erste wichtige Hinweise auf die grundlegenden Mechanismen der Russreduktion liefern.



Figur 7 : Typisches Schattenbild eines einzelnen Einspritzstrahls



Figur 8 : Strahlkonturen von 12 einzelnen Einspritzstrahls

Eine vertiefte Literaturrecherche [29] zum Thema der homogenen Kompressionszündverbrennung magerer Gemische (HCCI) wurde zuhanden des Industriepartners *IVECO* im Projekt **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse** [12] erstellt. Darin wurde bestätigt, dass sich HCCI insbesondere durch tiefe Stickoxid- wie auch Russemissionen auszeichnet. Dies ist eine Folge

der tiefen Verbrennungstemperaturen, die auf den weit überstöchiometrischen Betrieb (geringe lokale Energiedichte) zurückzuführen sind. Anhand von 3D-CRFD-Simulationen sollen konkrete HCCI-Strategien vorausberechnet werden. Erste Validierungen ermöglichen publizierte experimentelle Datenbanken und laborinterne experimentelle Daten. Das Ergebnis der Simulation eines HCCI-Prozesses zeigte eine überraschend gute Übereinstimmung mit dem Brennbeginn, jedoch eine schlechte Übereinstimmung mit dem gemessenen Brennverlauf.

Fortschritte bei der detaillierten Rekonstruktion der atmosphärischen CO₂-Konzentration und deren Zusammenhang mit dem Klima sind eine wichtige Voraussetzung um den zu erwartenden weiteren CO₂-Anstieg und dessen Folgen abzuschätzen. Im Projekt **Zuverlässigkeit der Rekonstruktion der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration anhand polarer Eiskerne** [13] wurde insbesondere der Verlauf der atmosphärischen CO₂-Konzentration in gewissen Klima-Epochen genauer untersucht. Im Verlauf des Holozäns (Nacheiszeit) sank die CO₂-Konzentration von knapp 270 ppmv am Ende der letzten Eiszeit (vor rund 10000 Jahren) bis auf 260 ppmv um 8000 Jahre vor heute, um dann kontinuierlich auf den vorindustriellen Wert von 280 ppmv anzusteigen. Messungen am Eisbohrkern von Taylor Dome haben ergeben, dass die atmosphärische CO₂-Konzentration während der letzten Eiszeit Variationen von rund 20 ppmv aufwies. Die Variation laufen parallel mit klimatischen Schwankungen, den sogenannten Heinrich-Ereignissen. Im Laufe des Projekts ist es gelungen, den Anstieg der CO₂-Konzentration beim Übergang der letzten Eiszeit zur Nacheiszeit sehr detailliert zu rekonstruieren. Diese Rekonstruktion sollte entscheidend mithelfen, die Prozesse zu verstehen, welche diesen natürlichen Anstieg verursachten. Ausserdem wurden in der Messtechnik Fortschritte gemacht.

Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr abgeschlossen wurde das KTI-Projekt **Particulates of Piston Engine Combustion Processes** [20]. Dabei konnte gezeigt werden, dass moderne, voll elektronisch kontrollierte Hochdruck-Einspritzsysteme in der Lage sind, die Partikelemissionen sowohl in der Anzahl als auch in der Masse um mindestens einen Faktor zehn zu senken. Diese Aussagen gelten sowohl für die grossen 2-Takt Schiffsdieselmotoren

(4RTX-3 von NSD) als auch für Lastwagen- und PKW-DI-Dieselmotoren. Der bekannte trade-off zwischen NO_x und Partikelemissionen (Fig. 9) bleibt hingegen erhalten.

CO₂ und NO_x-Emissionen von künftigen Gasturbinen müssen drastisch gesenkt werden. Katalytisch stabilisierte Verbrennung, deren Grundlagenforschung seit Beginn des BFE-Programms

Feuerung und Verbrennung am PSI unterstützt werden [2,4], ermöglicht eine stabile Verbrennung von Erdgas in Gasturbinen bei den folgenden Anwendungsgebieten: Verbrennung von Erdgas in Luft mit NO_x Emissionen unter 3 ppm (*Ultra Low NO_x Combustion*) und emissionsfreie Energieerzeugung, wobei Methan mit durch Verbrennungsgase hochverdünntem Sauerstoff umgesetzt wird, was eine einfache Abtrennung des gebildeten CO_2 ermöglicht (*Zero Emission Power*). Mit der Zielsetzung, ein durch Labor- und Pilot-Experimente verifiziertes Modell zur Auslegung von katalytischen Brennkammern für diese neuen Gasturbinenkonzepte zu erstellen, wurde im Berichtsjahr das KTI-Projekt **Modellierung und Auslegung eines CO_2 und NO_x freien Brenners für ALSTOM Power Gasturbinen** [21] gestartet.

Ende Jahr wurde von der KTI eine erste Tranche für das Projekt **Grundlagen der H_2 -Reformat-Zumischung am Ottomotor** [22] an der Fachhochschule HTA-Biel bewilligt.

Stickoxid-Reduktion bei Dieselmotoren war am 11. Mai Tagungsthema bei der Firma LARAG in Wil. Den vielen anwesenden Industrievertretern wurde u. a. das nun abgeschlossene KTI-Projekt **NO_x -Reduktion bei mobilen Dieselmotoren** [23], einer Zusammenarbeit des Instituts für angewandte Umwelttechnik (umtec) der Fachhochschule Rapperswil mit verschiedenen Industriepartnern, vorgestellt. Neben den technischen Aspekten wurden auch die politischen, ökologischen und ökonomischen Zusammenhänge aufgezeigt. Im Anschluss konnte das DENOX-System am Versuchsfahrzeug (Mercedes Benz Typ 1324 der Camion Transport AG) besichtigt und über praktische Erfahrungen im Betrieb diskutiert werden.

Das **Combustion Competence Center Meeting** wurde am 11. Juni 2001 an der ETH-Zürich abgehalten. Vorgestellt wurde der laufende Stand der meisten laufenden ETH/PSI Verbrennungsprojekte.

Die **Vision Nullemissions-Dieselmotor** stand am BFE/ENET-Seminar vom 15. Juni am PSI zur

Diskussion. Berichtet wurde industrie- wie hochschulseitig über den aktuellen Stand der Forschung. Im Seminar sollten realistische Wege zur Erreichung der Vision erarbeitet werden.

Das **Programm Feuerung und Verbrennung** wurde im Berichtsjahr gleich zweimal evaluiert: Ende Juni wurde am PSI ein Audit mit 6 internationalen Experten durchgeführt, das auch über die PSI-Verbrennungsforschung zu befinden hatte. Im Auftrag des BFE evaluierte das Büro Hanser&Partner (H&P) zusammen mit dem Fachspezialisten Prof. F. Mayinger (TU-München) und Dr. Ch. Meier, Direktor CCSO, Givisiez, als Umsetzungsexperte das Programm anfangs Juli. Beide Expertengruppen kamen zum Schluss, dass gute Forschung auf hohem Niveau geleistet wird. Der Schlussbericht von H&P folgt Anfang 2002 zuhanden des BFE und der CORE.

Die Tagung der Schweizerischen Vereinigung für Verbrennungsforschung (SVV, www.svv.ethz.ch) vom 5. Oktober 2001 an der Fachhochschule Aargau in Brugg-Windisch stand unter dem Motto **Einbezug der Fachhochschulen ins Programm Feuerung und Verbrennung**. Ziel der Tagung war die Klärung der Frage, unter welchen Bedingungen das BFE und die KTI gemeinsam eine verstärkte Einbindung der Fachhochschulen in die Verbrennungsforschung künftig fördern wollen. Mit der Aufforderung, in einigen Jahren tragfähige Netzwerke in verbrennungsrelevanten Aktivitäten aufzubauen und dabei eine Führungsrolle zu übernehmen, waren die unter den rund 60 Teilnehmern zahlreich anwesenden Fachhochschulvertreter offenbar überfordert. Dankbar aufgenommen wurde das BFE-Angebot, mittels Kleinaufträgen Ergänzungen zu Diplomarbeiten mit exzellenten Kandidaten zu finanzieren. Bis Ende 2001 wurde je ein Projekt an den Fachhochschulen Horw und Freiburg realisiert.

Das *Joint Annual Meeting* der *European Research Community on Flow Turbulence and Combustion* (ERCOFTAC) und des Leonhard Euler Kompetenzzentrums für Messtechnik, Verbrennung und Schadstoffformation wurde am 9. November 2001 an der ETH-Zürich durchgeführt.

Internationale Zusammenarbeit

Unter dem Titel **Common Rail Based Improved Combustion for Low Emissions (CRICE)** [24] läuft am LVV seit Mitte 2000 das EU-Projekt

GRD1-1999-10457, eine Zusammenarbeit mit der *Univ. Politecnica de Valencia* und den Industriepartnern Fiat, ALV, R.Bosch und IVECO.

Das im Rahmen des EU-Forschungsprogramms ENERGY/CLEAN ENERGY bewilligte PSI/ALSTOM-Projekt **Advanced Zero Emission Power Plant** [26] (NNE5-CT2001-00055) kann voll vom PSI-*Know How* aus den bisher vom BFE geförderten Projekten [2, 3, 4, 18] profitieren.

Das LVV ist bei der **Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen** (FVV) im Arbeitskreis HCCI dabei. Im LVV/FVV-Projekt [12] wurden Grundlagen erarbeitet. Ein Folgeprojekt, in dem das LVV ein genaueres Verständnis der Selbstzündung von Kraftstoffen zu erarbeiten hat, wurde von unabhängigen Gutachtern geprüft und positiv beurteilt. Es kann im Frühjahr 2002 starten.

Am 2. – 6. September 2001 fand in Zürich die vom LVV organisierte **17th Annual Conference**

on Liquid Atomization & Spray Systems statt. Über 240 Teilnehmer aus 16 Ländern, wovon 120 Industrievertreter, wurden in 132 Vorträgen und 20 Postern über den neuesten Stand der Forschung und Entwicklung informiert.

Das **IEA-Task-Leaders-Meeting** wurde zusammen mit dem Jahrestreffen des amerikanischen *Flame Research Committee* und dem japanischen *Flame Research Committee* als *Joint International Combustion Symposium* in Kauaii, Hawaii vom 9. – 12. September 2001 durchgeführt [30]. Dabei konnten unsere anwesenden Forscher neue Kontakte, u.a. mit dem *Sandia National Laboratory* (USA), dem *National Research Council* (Kanada) und insbesondere mit japanischen Instituten knüpfen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Sowohl für Heizungs Brenner als auch für Gasturbinen und Motoren ist immer noch ein beträchtliches NO_x-Reduktionspotential vorhanden. Mittels P+D-Projekten wird das gesamte vorhandene Fachwissen gezielt mit Industriepartnern in dieser Richtung umgesetzt und darauf geachtet, dass die Energieeffizienz möglichst wenig Einbußen erleidet. Der heutige Handlungsbedarf der massgebenden Firmen und der politische Druck auf die jeweilige Branche ist jedoch unterschiedlich und reflektiert sich direkt in der Anzahl der P+D-Projekte.

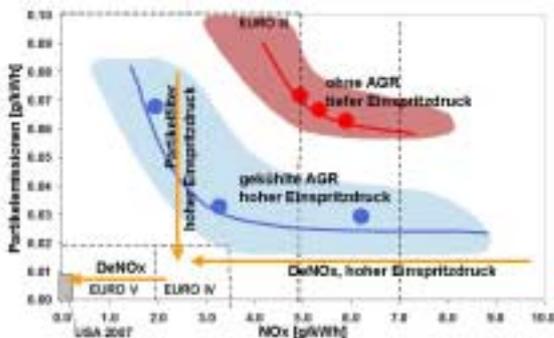
Im Projekt **NO_x-Reduktion beim Ygnis Varino-Brenner** [14] wird in Zusammenarbeit mit Ygnis der Matrixbrenner optimiert. Die flammeninterne Rezirkulation oberhalb der Matrixplatte ist die Schlüsselgrösse für die NO_x-Reduktion. Herkömmliche 2-D stationäre Rechnungen mit dem k-ε Modell geben diese nur schlecht wieder. Deshalb wurden 3-D instationäre Simulationen an einem *Disk Stabilized Burner* durchgeführt, um die für die NO_x-Reduktion wichtige lokale Abgasrezirkulation zu untersuchen. Dazu wurden drei unterschiedliche Ansätze für die Reynolds Stresses angewendet: Der laminare Ansatz und turbulente Ansätze mit dem k-ε und einem Reynolds-Stress-Modell. Es zeigte sich, dass die k-ε Berechnung zu einer stationären Simulation konvergiert, da die turbulente Viskosität zu hoch ist und die transiente Fluktuationen gedämpft werden. Im Gegenteil weisen die anderen zwei Ansätze transiente und

stabile Fluktuationen bei allen verwendeten Gittern auf. Das berechnete, zeitlich gemittelte Strömungsfeld ist asymmetrisch, was anhand experimenteller Daten bestätigt werden konnte.

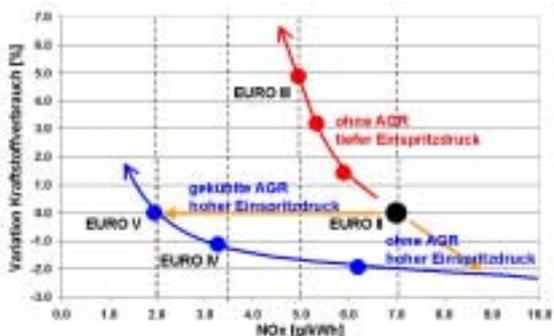
Ungebrochen ist im Bereich der motorischen Verbrennung der politische Druck in Richtung massiv niedrigerer Schadstoffemissionen. Die US- und europäische Gesetzgebung haben eine klare Marschrichtung vorgegeben (Fig. 9). Um gegen die finanzkräftige internationale Konkurrenz bestehen zu können, ist unsere zumeist mittelständische Verbrennungs-Industrie auf eine Zusammenarbeit mit den über entsprechende Kompetenz verfügenden Schweizer Forschungsgruppen angewiesen.

Am LVV wurde im Rahmen des abgeschlossenen Projekts **Swiss Common Rail** bewiesen, dass die EURO-III Normen prinzipiell ohne Abgasrezirkulation (AGR) und –nachbehandlung mittels Hochdruck Common Rail Einspritzung erfüllt werden können. Die Industriepartner LIEBHERR und HYDROMAG streben im Folgeprojekt **Common Rail Brennverfahren für EURO-III und EURO-IV-taugliche Nutzfahrzeugdieselmotoren** [15] an, für LIEBHERR-Motoren noch schärfere Emissionsgrenzwerte (Niveau EURO-IV) zu erfüllen. Im nun abgeschlossenen KTI-Projekt **Partikel aus der motorischen Verbrennung** [20] konnten am Liebherr-Einzylindermotor u.a. die Partikelgrössenverteilungen verschiedener reiner Kraftstoffen sowie auch von Diesel-Butylalginemischen mit Hilfe modernster Messgeräte charakte-

risiert werden. Es konnte festgestellt werden, dass durch Additivierung von Butylal zu herkömmlichem Dieselkraftstoff die Partikelemissionen bezüglich Masse und totaler Anzahl Partikel stark gesenkt werden. Ausserdem haben der Brennstoff und das Brennverfahren (Einspritzsystem und Einspritzparameter, Abgasrückführung) einen sehr grossen Einfluss auf die Anzahl und Grösse der vom Dieselmotor emittierten Russpartikel. Ferner hat es sich gezeigt, dass es mit elektronisch gesteuerten Hochdruck-Einspritzsystemen (Common-Rail) möglich ist, die Partikelemissionen bezüglich Anzahl und Masse mindestens um einen Faktor zehn zu beeinflussen. Zur Charakterisierung der Russformation und -oxidation wurde eine neuartige Mehrfarbensonde entwickelt und erfolgreich eingesetzt. In Kombination mit neuartigen analytischen Instrumenten gelang es, die Russbildung und -oxidation in der dieselmotorischen Verbrennung bei Variation verschiedener Parameter (Einspritzzeitpunkt, Einspritzdruck, AGR-Rate, Brennstoffzusammensetzung, u.s.w.) in bisher nicht gekanntem Detaillierungsgrad zu beschreiben.



Figur 9: Tradeoff NOx-Partikelemissionen, Einzylinder Nutzfahrzeugdieselmotor



Figur 10: Tradeoff NOx-Kraftstoffverbrauch, Einzylinder Nutzfahrzeugdieselmotor.

Die Kombination Hochdruckeinspritzung-Abgasrückführung wurde am Einzylindermotor im

Detail untersucht. Mit dieser Strategie konnten die Hauptemissionskomponenten Partikel und NOx als auch der Brennstoffverbrauch gesenkt werden. Aus den Fig. 9 und 10 kann entnommen werden, dass die Emissionsgrenzwerte EURO-IV beinahe erreicht wurden. Die Werte resultieren aus der Gewichtung von 10 Prüfungspunkten im ESC-Testzyklus [31, 32, 33].

Ein zusätzlicher Prüfstand für einen Liebherr Vierzylinder-Nutzfahrzeugdieselmotor wurde aufgebaut. Um die im Jahr 2005 kommenden EURO-IV Normen zu erfüllen, werden verschiedene emissionsmindernde Massnahmen wie Hochdruckeinspritzung, interne und externe Abgasrückführung, Diesel-Wasser-Emulsionen, u.s.w. am Einzylinder- und am Vierzylindermotor erprobt.

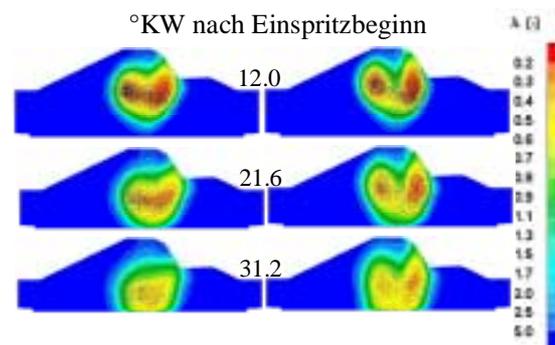
Das PSI bearbeitet mit der Firma Lambiotte (B) das Projekt *Investigation of Soot and NO-Production in Spray Combustion of Acetal/Diesel Mixtures* [16]. Versuche mit dem von der Firma Lambiotte vorgeschlagenen Diesel ZusatzMethylal (Dimethoxymethan, DMM) bestätigen die russreduzierende Wirkung dieses Azetals [34]. Messungen der Russkonzentration in einer Ethylen/Methylal Flamme stabilisiert auf einem Wolfhart Parker Brenner ergaben eine überproportionale Russreduktion ab Beimischungen über 15 % und übertrafen das Potential vom Dimethylether (DME) klar. Erstaunlicherweise ergeben kleine Beimischungen (kleiner 10 %) von DMM im Gegensatz zu DME eine stärker russende Flamme. Dieses Verhalten, das die komplizierte Abhängigkeit von Temperatur, Stöchiometrie und Brennstoff - Dissoziationsrate widerspiegelt, ist im einzelnen noch nicht verstanden und steht zunächst im Widerspruch zu den Resultaten aus Motorversuchen, in denen für jede Beimischung eine geringere Russmenge gefunden wurde [35]. Der Widerspruch wird allenfalls dadurch aufgelöst, dass evtl. auch im Motorzyklus zunächst mehr Russ gebildet wird, die intermediären Brennstoffkomponenten aber so zusammengesetzt sind, dass im folgenden ein effizienterer Russabbrand erreicht wird als mit Diesel-Brennstoff allein. Dieser Sachverhalt soll im Projekt [10] am PSI abgeklärt werden.

Bei Gasturbinen lassen sich durch die Vormischverbrennung wesentlich tiefere Schadstoffwerte erreichen. Weil sie zur Reduktion des NO-Ausstosses sehr mager betrieben werden, treten oft mechanische Vibrationen in sehr störender Art auf. Diese werden durch Instabilitäten der Verbrennung erzeugt. Inhomogenitäten in der

Wärmefreisetzung können zu beträchtlichen Druckschwankungen in der Brennkammer führen. Dies ergibt einen erhöhten Verschleiss oder kann gar eine Beschädigung der Turbine zur Folge haben. Für den Konstrukteur ist daher das vertiefte Verständnis dieser Phänomene wichtig. Ziel der Zusammenarbeit mit Alstom Power im PSI-Teilprojekt **Homogene Gasverbrennung** [17] ist die Erforschung der Wechselwirkungen von thermoakustischen Phänomenen mit Parametern wie Mischungsqualität oder Flammenstrukturen um die bei den GT24/26-ALSTOM-Gasturbinen aufgetretenen Probleme besser zu verstehen. Messungen wurden am Teststand von Alstom Power (ausgerüstet mit einem kommerziellen 700kW Brenner) durchgeführt. Zur Klärung der Prozesse, die diese Instabilitäten hervorrufen, wurde mittels OH LIF-Messungen das zeitliche Verhalten der Flammenzone bestimmt. Die über eine feste Phase der Schallschwingung gemittelten OH Bilder zeigten, dass die LIF-Intensität über eine Schwingung hinweg um etwa $\pm 15\%$ variiert. Ferner konnte gezeigt werden, dass sich die Flammenzone im Rhythmus der Schallschwingung um eine mittlere Position hin- und herbewegt und dass der äussere Teil der Flammenfront (nahe der Brennerwand) stärker und in entgegengesetzter Richtung oszilliert als der zentrale Teil.

Die Realisierbarkeit von Harnstoff-SCR bei Fahrzeugen ist Hauptthema im Vorhaben **NOx-Reduktion mit Harnstoff-SCR** [18]. Ziel der Arbeit ist die Entwicklung beschichteter SCR-Katalysatoren, die beim Einsatz an mobilen Dieselmotoren, d.h. bei instationärem Betrieb, bessere Eigenschaften aufweisen sollten. Die Technik zur Herstellung von Beschichtungskatalysatoren hoher Zelligkeit wurde im Berichtsjahr weiter verbessert und die erhaltenen Muster sowohl in Labortests als auch auf dem PSI-Dieselpfstand getestet. Deutliche Fortschritte, speziell auch bezüglich der Temperaturbeständigkeit der Katalysatoren wurden erzielt. Offen bleibt jedoch weiterhin die Frage, warum Katalysatoren auf Metallträgern gegenüber Cordieritträgern eine leicht schlechtere Performance aufweisen. Eine Kooperation mit einem Industriepartner auf dem Gebiet von SCR-Beschichtungskatalysatoren ist in Vorbereitung. Der Pfstand für den 6-Zylindermotor bei *Liebherr* konnte Mitte Jahr aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Erste stationäre Versuche mit einem kommer-

ziellen Vollkatalysator wurden durchgeführt und haben über einen weiten Bereich des Kennfelds Last-Drehzahl sehr hohe Entstickungsgrade ergeben. Die Untersuchungen am Oxidationskatalysator für NO haben gezeigt, dass wahrscheinlich das Oxidationsprodukt NO_2 einen inhibierenden oder gar vergiftenden Einfluss auf die Reaktion ausübt. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass die aktiven Platinteilchen durch das entstehende NO_2 verändert werden, wodurch ihre katalytische Aktivität zurückgeht.



Figur 11: Dreidimensionale Simulation (KIVA III) der Einspritzstrahlausbreitung für starken Drall (links) und für drallfreien Betrieb.

Das LVV arbeitet auch im Auftrag der FVV, die die Mitglieder (Automobilhersteller und -Zulieferer) aus dem gesamten EU-Bereich vereint. Beim vom BFE und von der FVV gemeinsam finanzierten Vorhaben **Modellbildung DI-Ottomotor** [19] wurden im Berichtsjahr die entscheidenden Schritte durchgeführt. Sowohl im Bereich des Experimentes als auch der Simulation sind die Projektziele voll erreicht worden: Zum einen die genaue Charakterisierung des Verbrennungsprozesses im DI-Ottomotor, vor allem durch umfangreiche, am LVV teilweise neu entwickelte Messtechniken. Zum zweiten ist es gelungen, den gesamten Hochdruckprozess mitsamt Einspritzung, Verdampfung und Verbrennung durch ein schnelles, phänomenologisches Modell abzubilden (Fig.11). Für insgesamt über 80 Betriebspunkte konnte eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten charakteristischen Prozessgrößen, beispielsweise Zylinderdruckverlauf oder Flammenausbreitung, festgestellt werden.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

In den Forschungsprojekten [1-13] ist die erwartete qualitativ hochstehende Leistung erbracht worden und zwei Dissertationen [28,33] sind abgeschlossen worden. Dasselbe gilt auch für die P+D-Projekte [14-19]. Interesse am SCR-Entstickungs-Verfahren [18] kam aus der USA, wo ab 2007 drastisch verschärfte Grenzwerte für *heavy duty* Dieselmotoren in Kraft treten. Der PSI-Vertreter wurde zum SAE-Meeting eingeladen [36].

In ihrem Zwischenbericht zur **Evaluation des Programms Feuerung und Verbrennung** zuhanden der CORE kam die internationale Expertengruppe zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Klare Konzentration auf ökologisch wichtige, wissenschaftlich interessante und hochaktuelle Themen.
- Sehr gute und klar abgestimmte Kooperation zwischen ETH und PSI.
- Sehr gute Balance zwischen kurzfristigen, stark anwendungsbezogenen Projekten und langfristigen Entwicklungsstrategien.
- Die internationale Herkunft der Industriepartner (die zum Teil die Projekte in der Schweiz mitfinanzieren) ist ein guter Indikator für die Qualität der Forschergruppen.

Nicht den erhofften Erfolg brachte die **SVV-Tagung** vom 5. Oktober.2001. Ziel war, neue Netzwerke zu initialisieren und Verantwortliche zu finden. Die Analyse der Reaktionen zeigt, dass eine tragfähige Vernetzung von Fachhochschulen untereinander und mit den Hochschulen ein Prozess sein wird, der sich über mehrere Jahre hinziehen und dessen Realisierung noch einiger Anstrengung bedarf.

Die **Ziele für 2002** sind:

- Qualität und Kontinuität in Forschung und Umsetzung sicherstellen.
- Ein Strategiepapier zur künftigen Förderung der Verbrennungsforschung z.Hd. der BFE-Geschäfts-leitung verfassen.
- Das Programm im Internet darstellen.
- Der weitere Einbezug der Fachhochschulen ins Programm fördern und entsprechende Netzwerke aufbauen.
- Die Entwicklung eines verbesserten Varinobrenners zusammen mit der FH-Horw, IGNIS und dem LTNT starten.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden

- [1] J. Lee (jerry.lee@ethz.ch) et al. LVV/ETH-Zürich: **Turbulente, chemisch reaktive Strömung in Motoren Brennräumen** (JB).
- [2] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Tieftemperaturverbrennung bei hohen Drücken** (JB).
- [3] P. Griebel (peter.griebel@psi.ch), PSI-Villigen: **Struktur turbulenter Vormischflammen unter Hochdruck** (JB)
- [4] T. Gerber (thomas.gerber@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Verbrennungsreaktionen in Gegenwart sauerstoffhaltiger Brennstoffe** (JB).
- [5] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Quantitative Laser-Induced Fluorescence in Combustion** (JB)
- [6] P. Bajaj und J.Gass (juerg.gass@ethz.ch), LTNT/ETH-Zürich: **Schadstoffreduktion durch Teil-Vormischung** (JB)
- [7] L. Blum (juerg.gass@ethz.ch), et al., LTNT/ETH-Zürich: **Experiment turbulente Gegenstromflamme** (JB)

- [8] L. Demiraydin und J. Gass (juerg.gass@ethz.ch), LTNT/ETH-Zürich: **Struktur turbulenter Diffusionsflammen** (JB)
- [9] R. Jeltsch (rolf.jeltsch@ethz.ch) et al., SAM/ETH-Zürich: **Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung** (JB)
- [10] T. Gerber (thomas.gerber@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Investigation of Spray combustion in Constant volume Combustion Cell** (JB)
- [11] S. Kunte (stefan.kunte@psi.ch) et al., LVV/ETH-Zürich: **Modellierung und Validierung von reaktiven, instationären 2-Phasenströmungen** (JB)
- [12] G. Barroso (juerg.gass@ethz.ch) et al., LVV/ETH-Zürich: **Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse** (JB)
- [13] B. Stocker (stocker@climate.unibe.ch), UNI-Bern: **Zuverlässigkeit der Rekonstruktion der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration anhand polarer Eiskerne** (JB)

Liste der P+D-Projekte

- [14] J. Gass (juerg.gass@ethz.ch) et al. LTNT/ETH-Zürich: **NOx-Reduktion beim Ygnis Varinobrenner** (JB)
- [15] R. Schubiger (rafael.schubiger@lvv.iet.mavt.ethz.ch) et al., LVV/ETH-Zürich: **Common Rail Brennverfahren für EURO-III und EURO-IV-taugliche Nutzfahrzeugdieselmotoren** (JB)
- [16] Th. Gerber (thomas.gerber@psi.ch), PSI-Villigen: **Investigation of Soot and NO-Production in Spray Combustion of Acetal/Diesel Mixtures** (JB).
- [17] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et al. PSI-Villigen: **Homogene Gasverbrennung** (JB)
- [18] M. Koebel (manfred.koebel@psi.ch), PSI-Villigen: **NOx-Reduktion mit Harnstoff-SCR** (JB)
- [19] K. Schänzlin (schaenzlin@lvv.iet.mavt.ethz.ch) et. al., LVV/ETH-Zürich: **Modellbildung Direct Injection (DI) Ottomotor** (JB)

Referenzen

- [20] S. Aufdenblatten (Sandra.Aufdenblatten@wartsila-nsd.com) et. al., Wärtsilä, Winterthur: **Particulates of Piston Engine Combustion Processes**. (SB).
- [21]A. Wokaun (Alexander.Wokaun@psi.ch), PSI-Villigen: **Modellierung und Auslegung eines CO₂ und NO_x freien Brenners für ALSTOM Power Gasturbinen** (JB).
- [22] J. Czerwinski (jan.czerwinski@hta-bi.bfh.ch) HTA-Biel: **Grundlagen der H2-Reformatzumischung am Ottomotor**
- [23] M. Brunner (heiri.hafner@hsr.ch) et. al., HSR, Rapperswil: **NOx-Reduktion bei mobilen Dieselmotoren** (SB).
- [24] K. Boulouchos (boulouchos@lvv.iet.mavt.ethz.ch) et al., LVV/ETH-Zürich: **Common Rail Based Improved Combustion for Low Emissions (CRICE)**
- [25] T. Kaiser (tony.kaiser@power.alstom.com) et. al., ALSTOM Power, Baden: **Advanced Zero Emission Power Plant**
- [26] A. Hintermann (alphons.hintermann@bfe.admin.ch): **Forschungsprogramm Feuerung und Verbrennung 2000-2003**

- [27] CH. Frouzakis et. al.: ***Transient Phenomena During Diffusion / Edge Flame Transition in an Opposed-Jet Hydrogen/Air Burner***, *Combustion Proc. Comb. Inst.*, vol 29, 2002, (*submitted*).
- [28] P. Bajaj, ***NOx-Reduction in Partially Premixed Combustion***, Dissertation ETHZ, Nr. 14492, 2002.
- [29] G. Baroso, K. Boulouchos: Literaturrecherche zur homogenen Kompressionszünd-Verbrennung dieselmotorischer Kraftstoffe (HCCI), Bericht ETH/IET/LVV Nr. 01/03, 2001.
- [30] G. B. Dummond, Ed.: ***XXII Task-Leaders-Meeting***, Proc. IEA-Conf. , Kauaii, Sept. 2001.
- [31] R. Schubiger et. al.: ***Influence of EGR on Combustion and Exhaust Emissions of Heavy Duty DI-Diesel Engines Equipped with Common Rail Injection Systems***, SAE Paper Nr 2001-01-3497.
- [32] Bertola et. al.: ***Characterization of Diesel Particulate Emissions in Heavy Duty DI-Diesel engines with Common Rail Fuel Injection: Influence of Injection Parameters and Fuel Composition***, SAE Paper Nr 2001-01-3573.
- [33] R. Schubiger: ***Untersuchungen zur Russbildung und -oxidation in der dieselmotorischen Verbrennung: Thermodynamische Kenngrößen, Verbrennungsanalyse und Mehrfarbenendoskopie***, Dissertation ETHZ Nr. 14445, 2001.
- [34] S. Kunte et. al.: ***Flame Experiments on the Soot Reduction Potential of Acetals in Diffusion Flames***, Proceedings of the 2001 Joint International Combustion Symposium (IEA, 23rd Task Leader meeting), Sept. 9-12 , Kauai, Hawaii (2001).
- [35] Bertola, et. al.: ***Oxygenated Fuels for Particulate Emissions Reduction in Heavy-Duty DI-Diesel Engines with Common-Rail Fuel Injection***, SAE-paper Nr. 2000-01-2885, (2000).
- [36] M. Koebel et. al.: ***Recent Advances in the Development of Urea-SCR for Automotive Applications***. SAE Technical Paper Series 2001-01-3635.

SOLAIRE ACTIF : CHALEUR ET STOCKAGE DE CHALEUR

Rapport de synthèse 2001 pour le programme de recherche

Jean-Christophe Hadorn

jchadorn@swissonline.ch



Stockage saisonnier de chaleur pour les bâtiments de la SUVA à Root, Lucerne

Le plus grand stock saisonnier de Suisse, construit en 2001 à Root est un stock diffusif composé de 45 sondes de 160 m de profondeur et délimitant un volume de 360'000 m³ environ. L'économie d'énergie que devrait procurer le stock est d'environ 500 MWh, tout en fiabilisant le fonctionnement des pompes à chaleur. La conception a utilisé tous les développements réalisés dans le programme de recherche de l'OFEN depuis 10 ans.

Centres de gravité du programme et buts fixés

L'énergie solaire thermique peut contribuer à réduire notre consommation d'énergie fossile de manière importante. Plus de 50% des besoins d'énergie de la Suisse sont représentés par la fourniture de chaleur à basse température (20 °C pour le chauffage des locaux, 45 °C pour l'eau sanitaire). Notre connaissance des techniques de production d'eau chaude est grande avec plus de 20 ans de R&D. Cependant les questions de fiabilité et de coût restent centrales pour l'acceptation par un grand marché. Ces deux aspects peuvent être améliorés par la recherche : fiabilité par le choix des matériaux et du *design* basé sur la connaissance du comportement des produits mis en œuvre, ainsi que par des outils de dimensionnement adaptés au marché, coût par l'amélioration continue des performances domaine de la recherche, l'effet de volume étant du ressort de l'industrie.

Le programme *Solaire actif: chaleur et stockage de chaleur* a été organisé en 2001 autour des axes suivants [28,29]:

1. **Composants de l'industrie solaire** : améliorer la connaissance scientifique des capteurs solaires thermiques, des matériaux et des systèmes. Les buts sont de maintenir le niveau de qualité des capteurs et systèmes sur le marché par des tests systématiques et exigeants, et d'offrir à l'industrie un niveau élevé de conseils pour la conception et l'amélioration de composants ou systèmes à énergie solaire.

2. **Systèmes standardisés** : rechercher les meilleures combinaisons de composants pour les systèmes combinés de chauffage et d'eau chaude de maisons individuelles, avec une parti-

cipation active de nos experts dans la Tâche 26 du programme *Solar Heating and Cooling* (SHC) de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie). Le but était pour 2001 de mettre au point le banc d'essai de systèmes à Rapperswil et de simuler les systèmes de provenance suisse.

3. **Solaire à concentration** : caractériser en conditions estivales la mini-centrale solaire thermique *SPS* 10 kW électriques, version Proto 2. Le but était de produire des kWh électriques d'origine solaire et de tester le couplage des capteurs à concentration et de l'unité thermodynamique.

4. **Stockage saisonnier de chaleur** : rechercher un projet d'ampleur suffisante en Suisse pour envisager un stock saisonnier diffusif sans pompe à chaleur, et mieux comprendre les résultats de certains projets P+D mesurés durant 2 ou 3 ans.

5. **Stockage du futur** : enrichir nos connaissances de base sur le comportement de la zéolithe pour le stockage de chaleur à haute densité.

Le budget des programmes de recherche solaire étant en constante diminution depuis plusieurs années, certains axes ne peuvent être travaillés suffisamment en profondeur et risquent d'être arrêtés si les conditions financières difficiles se poursuivent et si l'industrie et les instances de recherche européennes ne peuvent pas contribuer davantage.

Notre programme ainsi défini pour 2001 est en parfaite cohérence avec les objectifs énoncés dans le *Plan directeur de la recherche énergétique 2000 • 2003*, en pages 32 et 33.

Travaux effectués et résultats acquis en 2001

COMPOSANTS DE LA TECHNIQUE SOLAIRE

Capteurs solaires thermiques et matériaux

Les travaux dans cet axe, qui représente 50% des moyens du programme, sont centrés sur le pôle de compétences du SPF à Rapperswil. En 2001 les projets suivants ont été réalisés [1] :

1. **Mesure des caractéristiques et test de qualité** de 43 capteurs à eau et de 2 capteurs à air proposés par l'industrie. Les cap-

teurs s'améliorent sensiblement d'année en année et les industriels font appel au SPF pour certifier leurs produits. Les bancs d'essai sont en permanence tenus en état de fonctionner et nécessitent pour ce faire le renouvellement périodique des équipements, la maintenance des infrastructures hydrauliques, mécaniques et électroniques, et l'amélioration permanente des logiciels gérant les mesures et leur introduction dans des bases de données (figure 1).

2. Mise au point d'un nouveau banc d'essai pour les capteurs particuliers, par exemple, sans glycol et pour ceux de 12 m²; ce qui correspond à la tendance de l'industrie pour réduire les coûts.



Figure 1 : banc d'essai d'un bloc capteur de 12 m²

3. Participation à la mise en vigueur des normes européennes EN 12975-1 et EN 12975-2 sur les tests de capteurs. La standardisation est la base de la fiabilité des produits.
4. Comparaison des résultats des tests de Rapperswil avec ceux de son homologue allemand. Des différences de 5% ont été observées, puis expliquées par le fait que le laboratoire allemand utilise un soleil artificiel.
5. Développement d'un appareil de mesure des pertes thermiques par la face avant des capteurs dans le but de trouver les moyens de réduire ces pertes.
6. Finalisation de **l'accréditation du laboratoire SPF** selon les standards européens, de manière à pouvoir obtenir le label *keymark* qui sera prochainement exigé pour les laboratoires de test en Europe.
7. Le **CD-ROM SPF-Info CD 2001** a été publié. Il représente une masse d'informations considérables sur les capteurs solaires testés et est un peu la mémoire du centre de tests depuis plusieurs années (179 capteurs décrits et caractérisés). Il n'a pas d'équivalent en Europe. Il est distribué à plus de 9000 exemplaires en Europe et le taux de retour des paiements (53 CHF pour les frais) est très bon, montrant l'attrait du produit chez les professionnels du solaire. C'est l'outil principal du transfert de connaissances du SPF vers le marché.
8. La participation de la Suisse à la Tâche 27 du programme **Solar Heating and Cooling (SHC)** de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), intitulée **Performance of solar façade components**, qui s'occupe des matériaux transparents, absorbants et réfléchissants, a été assurée notamment pour la direction de la sous-tâche *Durability*. De nombreux tests de durabilité de couverture anti-réfléchissante et de réflecteurs à aluminium anodisé ont été assumés par le SPF.
9. La fin des travaux du groupe *Materials in Solar Thermal Collectors*, prélude à la Tâche 27 du programme SHC de l'AIE, a conduit à la décision de réalisation du livre *Performance and durability assessment of optical materials for solar thermal systems*, à paraître en 2002 chez Elsevier Science. Le SPF doit assumer 4 chapitres de cet ouvrage synthétisant 4 années de travail de 5 équipes de recherche.
10. Des **tests de vieillissement des absorbeurs solaires** en atmosphère chaude et humide ont été accomplis sur demande de l'industrie. Des bancs d'essai spéciaux sont utilisés tout au long de l'année pour tester mécaniquement et thermiquement 31 différents types de raccords entre capteurs, un point très fragile des installations en toiture. Quatre ont été certifiés.
11. Le dégazage des matériaux d'isolation, occasionnant des dépôts en surface d'absorbeur ou sous les vitrages, est également un thème de recherche lié à la durabilité des capteurs, encore plus critique avec les futures couvertures transparentes anti-réfléctives. Un banc d'essai a été construit.
12. Les **instruments de mesure** pointus du SPF (radiomètre spectral calibré à Davos et mesure de l'effet dit IAM de l'incidence du rayonnement sur couverture et absorbeur) sont quotidiennement utilisés pour qualifier les composants des capteurs ou étudier le vieillissement.
13. Un banc d'essai d'échangeurs à plaque, nouvelle tendance pour la boucle solaire, a été réalisé. L'entartrage calcaire est la principale source de préoccupation.
14. Une méthode de caractérisation des **pâtes de soudage** des tubes sur un absorbeur a été mise au point. Ces produits d'apport peuvent endommager la couche sélective des absorbeurs cuivrés, ce qui a été observé dans

la pratique. Il s'agit de comprendre quel matériau est responsable. 15 pâtes ont été testées, seule une semble adaptée à la technique solaire.

15. Le coefficient F' de 12 nouveaux absorbeurs a été mesuré au banc spécial à soleil artificiel.
16. La dégradation des nouvelles couches anti-réfléctives des couvertures transparentes est examinée sur des échantillons soumis à des conditions standard de manière à prévenir ce danger.
17. Le développement d'une qualité **Solarglas** pour le verre solaire a débuté. Il s'agit d'établir une description des performances minimales souhaitables pour les couvertures de capteur, et de la faire respecter. L'industrie utilise le mot *Solarglas* ou *verre solaire* sans aucune homogénéité et le consommateur final peut être trompé [3].

Outils de simulation

Les outils de simulation sont la base des projets réussis. Les ingénieurs doivent disposer d'outils capables de prédire au mieux les performances d'installations futures, et qui restent simples d'usage, faute de quoi ils sont rejetés. En outre, la professionnalisation de la distribution est nécessaire pour assurer une diffusion large des logiciels. Dans cette optique, le programme soutient les projets suivants [4] :

La version trilingue de **Polysun** 3.3 a été mise sur le marché en janvier 2001 et une version 3.3Plus en juin 2001. Elle comporte des outils graphiques pour suivre les valeurs horaires simulées, un générateur de rapports en 9 langues et 180 nouvelles stations météorologiques. La version de démonstration a fait l'objet de 3'400 demandes sur le site www.solarenergy.ch! En outre, une version fermée a été fournie à Hoval à 10'000 exemplaires pour une distribution à leurs revendeurs et distributeurs de langue allemande. 15'000 exemplaires supplémentaires sont en fabrication. Trois autres sociétés ont fait des demandes analogues qui seront honorées en 2002. Il s'agit d'une marque de succès pour Polysun qui démontre le besoin du marché. Le soutien au développement constant de la qualité et de la couverture du logiciel Polysun est un maillon essentiel d'une politique de recherche pour le solaire thermique.

Parallèlement, le développement de la version 4 de Polysun a débuté. La structure intrinsèque de

la programmation est revue dans cette version afin de rester à la pointe du traitement par objets dans un ensemble modulaire, de manière à faciliter la maintenance du logiciel et son adaptation aux nouveaux systèmes d'exploitation liés au Web.

Le développement du site Internet du SPF, qui a reçu 120'000 appels en 2001, a été orienté vers une programmation dynamique des pages, autorisant une gestion en base de données des informations beaucoup plus souple que la version HTML classique. Les pages peuvent être désormais modifiées par chacun des responsables à distance. La gestion dynamique a permis d'étouffer l'offre du site avec : le catalogue de capteurs testés, le catalogue de systèmes, le nouveau calculateur du coefficient F' d'un absorbeur AbsorberMaster, un moteur de recherche. De plus un glossaire solaire en 9 langues sera en ligne dès février 2002.

Le serveur du SPF, centre nerveux de l'ensemble des mesures effectuées à Rapperswil, qui datait de 1996 a été remplacé par un système de 72 GB de capacité sous Windows 2000 et toutes les procédures liées ont été révisées.

Dissémination des données météorologiques pour le projet solaire

Par le passé dans notre programme, la société Meteotest de Berne a développé le concept Meteororm qui met à disposition des ingénieurs, via un logiciel et une base de données sur CD-ROM, des données météorologiques solaires horaires pour tout point de la Terre, données précieuses pour simuler tout projet d'énergie solaire thermique avec Polysun ou Trnsys.

Un projet européen regroupant 7 instituts de recherche poursuit un but semblable, mais plus large en données qui seront disponibles et surtout accessibles uniquement par le Web. Meteotest participe pour la Suisse à ce projet dénommé **SODA**. Un accès provisoire a été ouvert à des fins de test en 2001. Le but est de simplifier l'accès aux données météorologiques mondiales pour le projet. Meteotest fournit des algorithmes de calcul du rayonnement sur surface inclinée et le calcul du trouble de l'atmosphère. L'ensemble, développé en Java et XML, est ambitieux. Un travail sur le public cible de cet outil nous semble cependant encore nécessaire pour affiner le produit [9].

SYSTEMES ET INSTALLATIONS SOLAIRES POUR LE BATIMENT

Cité solaire de Plan-les-Ouates

Le rapport final de ce projet de recherche a été publié en 2001. Il s'agit là d'un très bon rapport scientifique montrant les avancées techniques et les difficultés rencontrées pour l'exploitation de la cité et de sa toiture solaire innovante en 1998. Les résultats de ce projet sont utilisés par le fabricant de la toiture sur les marchés internationaux [24].

Systèmes combinés : mesures et optimisation

Les composants et matériaux doivent être étudiés pour eux-mêmes. Cependant la somme des

composants constitue un système qui doit être étudié afin d'optimiser son fonctionnement. Le marché du client final est acheteur de système et non pas d'éléments et ce sont ces systèmes qu'il convient de crédibiliser et de standardiser. C'est une des missions de notre programme.

Le système le plus répandu en Suisse est le **kit solaire de préparation d'eau chaude sanitaire** pour une maison familiale. Nous avons par le passé en Suisse développé le savoir-faire de mesures rapides pour caractériser de tels systèmes. Plus de 20 ont été testés entre 1996 et 2000. La demande de l'industrie est désormais plus faible (deux en 2001). Le SPF maintient cependant les équipements, car la génération suivante arrive [2].

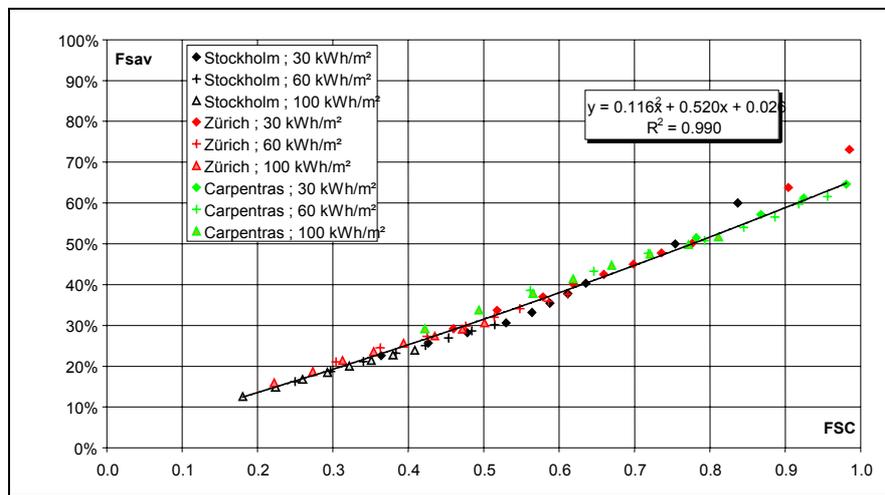


Figure 2 : Une nouvelle méthode de caractérisation des installations solaires combinées, développée dans la Tâche 26 du programme SHC de l'AIE par Thomas Letz, permet un alignement surprenant de divers cas d'optimisation : c'est là une réelle innovation depuis la fameuse méthode phi-fchat de 1979. F_{sav} = Fraction of energy saved by solar, F_{sc} = Fractional Solar Consumption. Voir le site de la [Tâche 26](#)

Par contre, les **systèmes dit combinés** ont été peu étudiés en laboratoire alors que leur potentiel sur le marché est grand. Le SPF a construit un banc d'essai complet de tel système (5 à 25 kW) [2]. Les capteurs et la demande en chaleur du bâtiment et pour l'eau chaude sanitaire sont simulés, mais la régulation, le stock et l'appoint sont physiquement testés. L'investissement dans un tel laboratoire est important et la mise au point délicate. Par exemple, la mesure des quantités de gaz consommé chaque minute doit être très précise. Les développements en matière de système combiné en Europe imposent cependant de pouvoir tester le système en entier si on veut soit certifier que les performances annoncées par

le fabricant sont effectives, soit améliorer la conception d'ensemble, pour mieux utiliser les kWh solaires et donc réduire le coût. Une période typique de tests est de 12 jours et le banc du SPF permet de réaliser toute combinaison de conditions d'exploitation comme dans la réalité. Une difficulté réside dans la définition de ces conditions. L'apport de la **Tâche 26 du programme SHC de l'AIE Solar Combisystems**, que nous avons initiée en 1999, est ici déterminant: le dialogue entre laboratoires et chercheurs européens débouchera certainement sur une norme de tests dans les mois à venir (EN 12976, et 12976-2 : Thermal solar systems and components – Factory made systems). Signe positif de

notre anticipation, 13 fabricants de systèmes combinés, dont 7 suisses, se sont inscrits pour un test au SPF, également grâce au soutien de la SOFAS et de la PROMES pour faire connaître le banc en Suisse. Compte tenu des moyens mis en œuvre, un test ne peut être offert gratuitement et l'industriel participe au coût. Le test sera à l'avenir un élément important de certification de qualité et permettra d'améliorer tout système mesuré: un modèle dynamique est en effet construit pour chaque système qui, validé sur les mesures, permet des simulations de variantes d'exploitation. Il s'agit du premier banc d'essai de cette ampleur au monde dans le domaine, qui sera pleinement opérationnel en 2002.

La Tâche 26 du programme SHC de l'AIE, intitulée **Solar Combisystems**, a terminé sa troisième année de travaux. Rappelons qu'elle regroupe 10 pays dans le but d'améliorer les systèmes combinés par optimisation et d'aider à les faire connaître sur le marché. La Suisse prend une part active à ces travaux, notamment en dirigeant la sous-tâche *Survey and dissemination of results*. En 2001, grâce à deux meetings d'experts, dont un organisé par la Suisse à Rapperswil, et l'efficacité du courrier électronique, la [deuxième lettre d'information](#) qui expose les résultats de la Tâche à l'intention de l'industrie a été publiée. Une nouvelle méthode de comparaison des systèmes entre eux a été imaginée par un expert de France et testée par tous (figure 2). Elle se révèle très efficace pour évaluer rapidement la performance d'un système par rapport aux autres disponibles sur le marché et positionner tout point d'une analyse paramétrique [8].

Durant 2001, toutes les conditions aux limites nécessaires pour les comparaisons des 21 systèmes génériques recensés et décrits en 1999 et 2000 ont été définies. Ce sera sans doute d'ailleurs la base d'une future norme. Les bancs d'essai et les procédures de test ont été finalisés, et les modules logiciels manquant ont été développés. Tous les instruments sont en place pour l'évaluation comparative durant 2002.

Notre programme a deux équipes participant à la Tâche 26 du programme SHC de l'AIE : l'équipe de Rapperswil qui se concentre sur l'optimisation d'un système *tank-in-tank*, et qui a en 2001 construit le banc d'essai décrit précédemment et défini les procédures de tests, et l'équipe EPF-Lausanne & EIVD Yverdon qui étudie un système combiné de type Arpège d'Agona. Cette dernière équipe poursuit deux buts: d'une part **l'optimisation d'un système combiné** comportant

l'appoint intégré dans la cuve de stockage, d'autre part la mise au point d'algorithmes de contrôle optimal pour une **commande prédictive de systèmes combinés** [5].

L'optimisation est conduite à Yverdon par le LESBAT de l'EIVD de la manière suivante [25] : mesures d'un système de 12 m² pour 900 litres de stockage installé dans une maison familiale (économie mesurée 25%) et étude en laboratoire d'améliorations de l'installation notamment de la cuve. Un modèle Trnsys de l'installation a été mis au point et permet l'analyse paramétrique en vue de maximiser la performance de l'installation. L'étude a déjà permis en 2000 une diminution des pertes thermiques de 35% par différents dispositifs qui ont été introduits à la fabrication. En 2001, toutes les pistes simples ont été investiguées pour augmenter la fraction solaire, mais sans donner de résultat probant. Les améliorations restent marginales et la commande prédictive paraît la voie la plus prometteuse.

La commande prédictive développée par l'Institut d'automatique (IA) de l'EPF 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. L'algorithme dérive de celui mis au point pour les kits solaires les années précédentes. Le paramètre d'optimisation est la puissance de l'appoint, avec une contrainte sur le confort intérieur et la température de fourniture de l'eau chaude sanitaire. La puissance solaire peut également être *optimisée* en modulant le débit de la pompe solaire, et il est démontré que l'optimum est atteint lorsque le débit est proportionnel à l'irradiance. L'algorithme comprend une commande dite anticipative (calcul de la température de départ du chauffage optimale sur la base de prévisions de la température et de l'ensoleillement, ce qui nécessite l'inversion du modèle du bâtiment) et une commande à réaction corrigeant les éventuels écarts observés sur la température ambiante (le modèle du bâtiment n'est en effet jamais parfait, car simplifié). En 2001, la commande prédictive a été implémentée sur un ordinateur relié au banc d'essai du LESBAT/EIVD, mais des difficultés liées à la précision des mesures et à la non-fiabilité des ordinateurs ont entraîné un retard important. Durant 2002, il conviendra de rattraper ce retard tout en développant la commande avec un industriel du réglage pour une implémentation sur un microprocesseur.

PRODUCTION DE HAUTE TEMPERATURE ET D'ELECTRICITE

Centrale solaire pilote de 10 kW_{el} SPS [6,7,26]

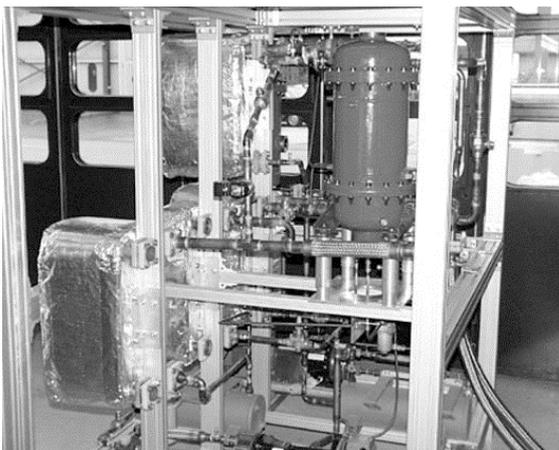
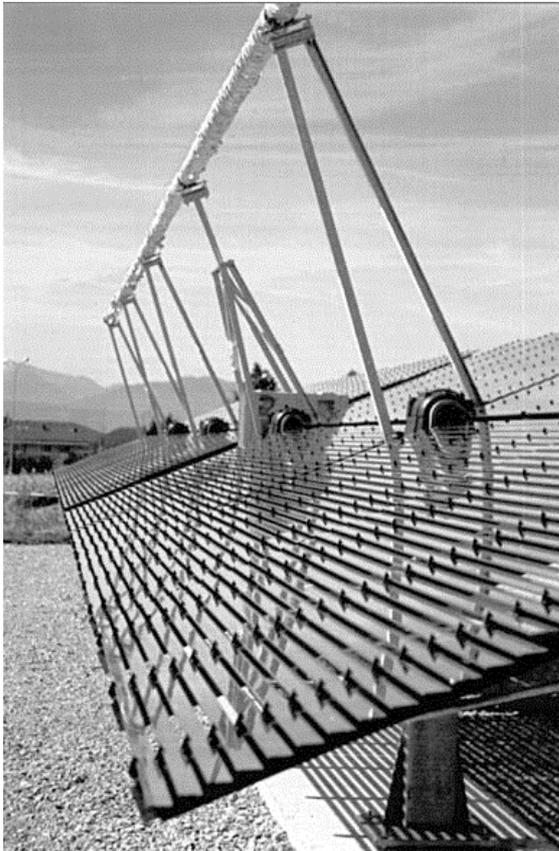


Figure 3 : Capteurs CEP de Cogener et unité thermodynamique de 10 kW_{el} du LENI-EPFL basée sur des turbines scroll

La possibilité de produire de l'électricité par voie solaire thermique a été démontrée en 2000 durant quelques heures. Il s'agissait en 2001 dans

le projet **SPS** du LENI-EPFL et de Cogener, d'une part, de travailler avec une puissance solaire doublée (construction de la deuxième ligne de capteurs) et, d'autre part, de faire fonctionner l'installation suffisamment longtemps pour démontrer la stabilité de la solution. La deuxième ligne de capteurs a été construite avec des améliorations notables par rapport à la première et le champ de capteurs CEP a fonctionné durant tout l'été 2001. La rupture du verre de l'un des 12 tubes Solel est à déplorer sans conséquence majeure pour l'exploitation des tests. Cependant la simplification de la ligne focale de réception est à rechercher, en s'affranchissant du tube sous-vidé acheté à l'extérieur. Le rapport final de la partie capteur CEP sera disponible en mars 2002, un délai ayant été accordé à Cogener.

Les essais de la partie turbine ont été concluants malgré de fréquentes petites pannes de différents composants mineurs: les ORC (Organic Rankine Cycle) ont montré une bonne tolérance à une source chaude à température et puissance variables, et ils se sont adaptés sans problèmes majeurs aux différentes conditions tout au long d'une journée. Ce qui constitue un succès. Cependant si le rayonnement solaire devient trop faible, les performances se dégradent substantiellement, surtout dans la configuration actuelle avec des turbines surdimensionnées par rapport au champ de capteurs solaires. De plus, en mode de fonctionnement solaire seul, le cycle à basse température ne produit plus d'énergie électrique en dessous de certaines conditions à l'évaporateur. Ce cas est fréquent en fin de journée ou lors d'un passage nuageux prolongé. Cependant le groupe de cogénération, installé en relève du solaire, a démontré l'avantage d'accroître la souplesse de fonctionnement par rapport au fonctionnement en mode solaire seul. Cette souplesse accrue permet d'abaisser la limite inférieure de rayonnement nécessaire pour l'utilisation de la centrale et rend l'installation attractive pour un dispatching, car elle est capable de fonctionner à puissance de sortie quasi constante.

Toutefois les performances de l'ensemble ne sont pas conformes aux attentes et des améliorations sont possibles et pourraient être réalisées en 2002. Les résultats de ce projet ouvrent la porte à:

- une application plus large des cycles de Rankine modulaires, qui dépasse le cadre purement solaire en offrant une solution crédible à la valorisation d'énergie thermique à basse

et moyenne température (rejets à 50 à 100° C)

- une application du capteur à concentration CEP dans des projets industriels ou agricoles en Suisse ou dans le bassin méditerranéen. Le capteur peut atteindre aisément 160 °C en conditions estivales en Suisse avec des efficacités dépassant 50% par rapport à la surface d'emprise des miroirs.

Le couplage solaire-ORC a été démontré. Les deux composants peuvent dès lors être de nouveau séparés pour poursuivre une voie d'optimisation de détail, chacun de leur côté.

STOCKAGE SAISONNIER DE CHALEUR

Optimisation d'installation et outils de simulation

Les années 2000 et 2001 ont été marquées par un fort ralentissement des projets pilotes avec stockage saisonnier de chaleur. Les nouvelles constructions d'ampleur sont peu nombreuses et l'investissement se porte avant tout et légitimement sur les économies d'énergie dites *passives*. Nous pensons que cette situation pourrait être passagère et nous mettons à profit cette période pour l'utilisation de toutes les données que nous avons obtenues lors de la mesure de projets pilotes entre 1996 et 1999. En outre, nous pensons qu'un projet P+D mesuré devrait pratiquement dans tous les cas faire l'objet d'une simulation *a posteriori* pour comprendre ce que l'on peut améliorer.

C'est ainsi que les mesures du projet **Wollerau** (36 sondes de 120 m) sont exploitées par le LEEE/SUPSI au Tessin pour calibrer un modèle de simulation horaire de l'installation complète, afin de déterminer tous les axes d'amélioration possible *a posteriori*. En 2001, le modèle de l'installation assez complexe de Wollerau, avec distribution possible de chaud et froid, basé sur Trnsys-Pilesim précédemment développé dans notre programme, a été finalisé. Les travaux de calage et d'optimisation se feront en 2002 [12].

Dans la même philosophie de valorisation des mesures sur des projets pilotes, les deux années de 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, sont également exploitées par le LEEE/SUPSI. Les mesures sont disponibles par pas de 15 minutes pour 1998 et 1999. Le modèle basé sur le DST

de Hellström, a été intégré au simulateur solaire TRNSYS entre 1993 et 1996 et adapté à diverses conditions particulières des stocks en Suisse depuis. Après calage, la comparaison entre mesures et calculs sur 2 ans est très bonne (moins de 0,2 °C d'écart, la température du stock ayant évolué entre 9 °C au minimum et 13,8 °C au maximum durant 2 ans). Le modèle désormais calé sera utilisé en 2002 pour effectuer une analyse paramétrique pour, d'une part, donner des règles de dimensionnement générique de telles installations et, d'autre part, rechercher un éventuel optimum économique [13].

Serso a débuté en 1994. Le domaine du stockage souterrain de chaleur nécessite des périodes longues de recherche pour tirer parti des informations récoltées sur le terrain, car la constante de temps d'un stock est de une année par définition. Les deux projets d'exploitation des mesures de Wollerau et Serso nous permettent en outre de maintenir des outils de simulation à la pointe du domaine pour le dimensionnement de projets nouveaux comme celui de la SUVA à Root.

Cas type et Recherche de projet pilote

La réalisation du grand projet de la **SUVA** à Root (Lucerne) a démarré en 2001 [16]. Il s'agit du plus grand stock saisonnier diffusif réalisé en Suisse. Plus de 4 années d'efforts ont été nécessaires à une équipe motivée que nous avons soutenue pour faire accepter le projet. Il s'agit du Centre d'innovation et d'opérations D4 qui abritera 2'500 personnes sur 130'000 m². La SUVA a souhaité faire un projet exemplaire. 50% des besoins réduits doivent être couverts par les énergies renouvelables. Pour la thermique, le concept mis en œuvre est semblable à celui du Collège de Pesieux (22'500 m³), projet pilote précédemment soutenu par notre programme durant la décennie 1990, et qui a donné des résultats de qualité en servant d'exemple au groupe de décision de la SUVA qui l'a visité. Le stock comporte 49 sondes de 160 m de profondeur, distantes de 6,5 m, soit un volume délimité de 360'000 m³, dans la molasse. Il est chargé en été par des rejets de chaleur et 660 m² d'absorbeurs solaires pour atteindre une température d'environ 25 °C au maximum.

Pour réaliser le meilleur dimensionnement possible, nous avons introduit dans le projet le concept **de tests de réponse sur 2 forages** préliminaires à la construction. Les travaux ont été menés en 1999 et l'analyse a été réalisée par

le LEEE/SUPSI dans un projet spécifique. Le rapport final montre le détail des simulations réalisées pour finalement caractériser le sous-sol par une conductibilité thermique de $3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ et surtout une résistance thermique effective de la sonde future de $0,1 \text{ K}/(\text{W/m})$, paramètre déterminant du dimensionnement des sondes. La méthodologie mise en œuvre constitue un exemple scientifique de premier rang et montre que nous possédons un savoir-faire pointu pour le dimensionnement des stocks et sondes souterrains [15].

Le cas de SUVA est en ce qui concerne le projet un exemple complet de ce que nous pouvons réaliser en Suisse après 15 ans de recherches et de projets pilotes : utilisation de l'expérience passée, visites d'installations pilotes, présentation du concept par le chef de programme très tôt dans le projet, mesures d'échantillons de roche en laboratoire, développement d'un chariot mobile de mesures de tests de réponse *in situ*, forages tests avec mesure de réaction thermique *in situ* pour déterminer la réponse du massif rocheux souterrain dans son ensemble, modélisation de l'ensemble avec le logiciel TRNSYS-Pilesim, optimisation du dimensionnement. La batterie de moyens que nous avons développés par le passé, et la somme de compétences que nous avons développées et rassemblées autour du projet, ont été mises en œuvre pour mettre toutes les chances de réussite du côté du projet. Bien entendu, nous devons saluer la décision de la SUVA en faveur d'une solution alternative au recours simple au gaz. Le financement de l'OFEN au titre P+D est important, mais pleinement justifié. L'installation sera en fonctionnement en 2003. Une campagne de mesures sera également financée dans notre programme.

Un des objectifs de notre programme P+D *Stockage* est de contribuer à réaliser en Suisse un premier projet pilote de stockage diffusif analogue à celui de la SUVA, mais sans pompe à chaleur. Un tel stock chargé en été par des capteurs solaires vitrés fonctionnerait entre 20 et $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 Winterthur a étudié durant les années précédentes les solutions optimales pour l'habitat neuf et la rénovation dans les conditions de la région de Zürich et a abouti à des solutions à coût raisonnable (100 CHF par mois et par appartement pour 50% solaire). La phase 2001 du projet **Saisonale Speicherung**

von Sonnenenergie im Erdboden a consisté à recenser et à rencontrer les investisseurs ou constructeurs de projets d'habitat de groupes de logements. Les cinq plus grands propriétaires d'immeubles de la région de Zürich ont été ainsi exposés au concept *solaire+stockage saisonnier*, concept qui a été réalisé avec succès en Allemagne à Neckarsulm. But : rechercher un projet concret pour lequel le concept pourrait être appliqué en Suisse. Les enseignements tirés des rencontres montrent la difficulté de faire passer des projets de production d'énergie alternative. Néanmoins la ville de Zürich pourrait être intéressée dans le cas d'une rénovation de plus de 120 logements en ville, prévue en 2002 • 2003. Les conditions aux limites sont cependant difficiles. L'étude se poursuit [11, 22, 23].

Par le passé, nous avons évalué différentes solutions de puits canadien dans le cadre de projets P+D de notre programme *Stockage de chaleur*. Une solution innovante pour le chauffage et le rafraîchissement a été réalisée par la société Ecoconfort (Préverenges, VD) à Satigny (GE). Ce projet, nommé **CostEAU**, est 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 (diamètre des tubes) et à l'exploitation (électricité réduite pour le circulateur). Il est situé dans la partie inférieure de la dalle, sous le bâtiment et sert au préchauffage de l'air neuf en hiver et rafraîchissement en été, en substitution d'un groupe de froid. Les mesures détaillées se sont terminées en automne 2001. Les premières analyses montrent un excellent fonctionnement de ce système (préchauffage en hiver de 3 à $5 \text{ }^\circ\text{C}$, amortissement d'amplitude de l'air chaud introduit en été de $7 \text{ }^\circ\text{C}$) et une robustesse malgré quelques défauts améliorables dans un prochain projet de ce type. Le rapport final est prévu pour la fin de l'hiver 2002 [20].

Plusieurs projets pilotes qui arrivaient en fin de contrat de mesures n'ont pas encore fait l'objet de rapports finaux de la part des requérants malgré nos injonctions [17,18,19]. Ce sont des projets qui ont connu des difficultés, dans un cas, de réglage de l'ensemble de l'installation de chauffage-ventilation, et dans les deux autres, de dimensionnement insuffisant, principalement en capteurs solaires pour la charge. Nous essaierons d'obtenir des rapports finaux en 2002.

À noter qu'une thèse réalisée à l'EPFL rassemblant nos connaissances sur le stockage en aquifère a été publiée en 2001. Elle clôt provisoire-

ment 20 ans de recherches en stockage en aquifère en Suisse, faute de marché [21].

STOCKAGE DENSE DE CHALEUR POUR L'HABITAT

Boucle test à base de zéolithe

Le stockage saisonnier de chaleur dans le sous-sol s'adresse aux besoins en chaleur dépassant 200 MWh environ. Pour l'habitat individuel, principal marché d'installations solaires en Suisse, de telles solutions ne fonctionnent pas, comme nous l'avons démontré au cours des années 90 dans différents projets. La cuve à eau reste le meilleur stock pour une villa, mais devient malheureusement volumineuse si l'on veut faire réellement du stockage saisonnier et satisfaire plus de 90% des besoins hivernaux. Nous avons donc orienté la recherche vers des solutions de densification de la capacité de stockage depuis 2000.

Une installation test du matériau **zéolithe** basé sur le principe plus simple du circuit ouvert a été construite au SPF de Rapperswil. Le but est, d'une part de mieux connaître le matériau et, d'autre part, d'évaluer les capacités d'échange et de transfert de chaleur. Aucun *échangeur eau-zéolithe* n'a encore été construit et tout est à découvrir. Le stock prototype de 400 litres a été chargé à 100, 150 et 200 °C par de l'air circulant dans les réacteurs et les temps de montée en température dans la masse du matériel de stockage enregistrés. La vitesse de pénétration de la chaleur est de 3 à 4 cm/min dans le matériau, ce qui entraîne le besoin de gradients importants à

la charge et des temps assez longs pour atteindre des régimes stabilisés (plus de 1 heure). En décharge, de l'air à 10 °C et 90% d'humidité a été injecté dans le stock gonflé à 100 °C, le gain en température de sortie de l'air n'a atteint que 25 °C. Ces résultats ont démontré que l'orientation vers la solution du circuit d'air fermé, plus délicate, est nécessaire et sera entreprise pour 2002 [10].



Figure 4: Prototype de stock en zéolithe 13X-1001 (ZEOCHEM MOLEKULARSIEB) du SPF

Collaboration nationale

Le programme est organisé en pôles de compétences : SPF pour les tests de matériaux, des capteurs, des stocks et de systèmes, EPFL et HES-SO pour le contrôle optimal des systèmes, LENI de l'EPFL et Cogener pour le développement de la production d'électricité par voie thermique, ZI-Winterthur allié avec le LEEE/SUPSI du Tessin pour le stockage saisonnier diffusif.

La collaboration entre le SPF et *l'industrie solaire suisse* a été intense en 2001. De nombreuses requêtes et mandats complémentaires, permettant de rentabiliser les infrastructures de mesures, proviennent également de toute l'industrie solai-

re mondiale, tant la renommée du SPF est grande.

La collaboration entre deux laboratoires de recherche l'un à l'EPFL (Institut d'automatique), l'autre à l'EIVD à Yverdon (LESBAT) et une industrie (Agena) s'est renforcée, permettant de préparer la voie à une réalisation industrielle pour les algorithmes du contrôleur optimal développé. Nous recherchons également le contact avec les associations Promes et Sofas en les informant périodiquement de sujets qui les concernent potentiellement.

Pour le projet SUVA, les compétences d'un bureau d'ingénieurs, d'un géologue et d'un thermicien du Tessin ont été réunies. Pour le projet *ZIW-Speicher* nous tentons de faire de même entre Winterthur et le Tessin.

Dans le projet SPS, le LENI de l'EPFL est associé au bureau de transfert de technologies Cogener.

Le projet **CostEAU** est le fruit d'une collaboration entre l'Université de Genève et l'entreprise Ecoconfort, concepteur de l'installation. L'Office cantonal de l'énergie participe aussi au financement de cette étude.

Plusieurs de nos groupes ont exposé leurs travaux à la conférence Cisbat 2001 organisée en octobre par le LESO de l'EPFL.

Collaboration internationale

Quatre de nos groupes (SPF, IA de l'EPFL, LESBAT HES-SO, Suter consulting) participent activement à la Tâche 26 *Solar combisystems* du programme *Solar Heating and Cooling* (SHC) de l'Agence Internationale de l'énergie (AIE). Cette Tâche 26 que nous avons initiée et projetée en 1998 avec un chercheur allemand et un chercheur suédois, s'étend de 1999 à 2002 et comprend 10 pays, qui évaluent, comparent et optimisent plus de 15 systèmes combinés du marché.

Suite à un séminaire international (35 participants) que nous avons organisé avec le SPF et la société Entry Technology des Pays-Bas, à Rapperswil en octobre 2001, une nouvelle Tâche du programme SHC de l'AIE est en préparation. Elle concernera vraisemblablement dès 2003, les techniques de stockage avancées pour atteindre des parts solaires élevées dans les maisons à basse consommation d'énergie. Cette Tâche serait pour la Suisse le prolongement des travaux de la Tâche 26 et de ceux concernant le stockage dense par zéolithe. Elle est cruciale à nos

yeux : l'enjeu deviendra un besoin du marché très prochainement et nous voulons le devancer. En outre, la collaboration est essentielle, car nous ne pourrions seuls assumer d'explorer toutes les voies possibles et nous nous impliquons fortement pour voir aboutir cette Tâche, comme nous l'avons fait pour la Tâche 26.

Peu de projets européens des programmes JOULE ou THERMIE sont accessibles au chercheur en énergie solaire thermique d'Europe, car ce domaine est négligé totalement dans les appels d'offres au motif que tout serait connu.

Un seul projet est en cours et se rapporte au domaine du bâtiment : [JOR3980240 Solar Building Façades](#), mené par le SPF Rapperswil

Nos chercheurs ont été présents lors de conférences internationales fréquentes en Allemagne (Intersolar, juillet 2001, Freiburg i. B. ; OTTI Symposium, mai 2001, Kloster Banz). Le congrès mondial ISES 2001 ayant eu lieu en Australie, aucun de nos chercheurs n'a pu y prendre part.

Projets pilotes et de démonstration

Pierre Renaud, chef du programme P+D

info@planair.ch

Les faits marquants, classés selon les lignes directrices choisies pour 2001, sont les suivants:

Promotion du solaire thermique dans ses applications les plus intéressantes et généralisables: 8 actions médiatiques (journées *portes ouvertes*, avec invitation de la presse, envois de dossier de presse, pose de panneaux d'information des visiteurs) ont fait connaître les récentes installations solaires (dont 7 en contracting) financées par le budget P+D; à cela s'ajoutent les

actions JSP (Jugend-Solar-Projekt). 12 fiches *bons exemples* supplémentaires seront en 2002 disponibles sur le futur site www.solarch.ch. L'énergie captée par l'installation de capteurs solaires non-vitrés pour chauffage de piscine de la Lenk s'élève, par exemple, à 650 kWh/m².

Installations financées selon le mode de contracting: L'intérêt rencontré les années précédentes pour la réalisation d'installations en *contracting* est lié au taux de subventionnement

très favorable accordé, et au fait que le risque n'est plus assumé par le consommateur, mais par l'investisseur. Cependant, pour emporter la décision, les prix de vente de la chaleur ont été minimisés, ne permettant pas de dégager une marge bénéficiaire suffisante. Il est peu vraisemblable que ce mode de financement soit à court terme une solution efficace pour le développement du marché en l'absence de subventions significatives.



Figure 5: Système combiné pour une villa

Suivi des installations, garantie de qualité:

Le projet accepté en 2000 visant à tester des méthodes de détection de dérive lente du fonctionnement des installations n'est pas assez avancé pour répondre à la question posée. Une définition précise du cahier des charges et des objectifs, et une démarche plus systématique et coordonnée, sont souhaitables à l'avenir. Les contacts entre la recherche académique, la recherche appliquée et la pratique doivent être stimulés.

Accroissement de la fiabilité: L'intérêt pour les installations *drain-back* (circuits capteurs pouvant être vidés) s'est confirmé en 2001, avec le démarrage de deux nouveaux projets pilotes de mesures (petites installations: projet 82711; grandes installations: projet 82708 [14]). Les problèmes rencontrés (par exemple, temps de purge trop élevé selon la configuration du système hydraulique, pompe peu efficace pour des

installations de 8 à 10 m de hauteur manométrique, méthode de dimensionnement hydraulique existante inadéquate pour de grandes installations) confirment la nécessité de tels projets. Parmi les résultats atteints à ce stade, il faut citer l'installation d'un clapet anti-retour accélérant la vidange du circuit capteurs et une liste de recommandations pratiques du fabricant concerné. Le développement d'une méthode de dimensionnement hydraulique adéquate pour les grandes installations (>20 m²) et sa vérification expérimentale sont également prévus.

Réduction des coûts d'investissement: Une pré-étude (projet 81632 [14]) a analysé la possibilité, pour des bâtiments locatifs existants, d'utiliser la boucle de circulation d'eau chaude comme circuit vers les capteurs (moyennant l'adjonction d'un échangeur externe et un mode de réglage particulier). Des boucles de circulation au tracé favorable permettraient une réduction significative des travaux d'installation et des coûts d'investissement (à titre d'exemple, sur la base d'un devis pour un bâtiment donné: •26% pour une installation de 77 m²). Une installation pilote appliquant ce principe devrait suivre. Elle permettrait de vérifier en particulier si le fonctionnement est conforme aux calculs théoriques.

Finalement, il faut signaler la construction et le test d'un prototype de réfrigérateur solaire à adsorption, autonome et transportable, dimensionné pour un climat de type sahélien (projet 81689 [14]). Ce réfrigérateur utilise le couple silicagel •eau. L'intérêt pour l'industrie suisse réside ici dans la fabrication de certains éléments essentiels, tels qu'un clapet anti-retour double-effet, spécialement mis au point et testé dans le cadre de ce projet. Une étude de marché pour ce type de réfrigérateur est en cours.

Le budget P+D a également contribué au maintien et à l'amélioration des infrastructures de test du SPF de Rapperswil, et aux mesures de systèmes *combi-compact* (eau chaude et chauffage) dans le cadre de la Tâche 26 du programme SHC de l'AIE.

Évaluation de l'année 2001 et perspectives pour 2002

L'année 2001 a été pour notre programme de recherche une année de qualité correcte:

1. Les tests et les recherches de base effectués au SPF ont contribué à maintenir la qualité des capteurs sur le marché et même à

l'améliorer. On observe également une professionnalisation de la mise à disposition des services du SPF, notamment via le CD-ROM SPF Info, avec une réduction parallèle des coûts de diffusion des informations grâce à la mise en place du serveur Internet.

2. Pour la comparaison des systèmes combinés dans la Tâche 26 du programme SHC de l'AIE, l'année 2001 a été une année charnière de préparation des méthodes et outils. Elle s'est déroulée favorablement avec une bonne coopération des groupes de la plupart des pays. Nous avons bon espoir que la Tâche 26 délivre de précieux résultats, non seulement scientifiques, mais surtout applicables pour le marché dans le choix des meilleurs systèmes.
 3. La production d'électricité solaire par voie thermique est difficile dans nos conditions climatiques. Le prototype SPS a fonctionné, mais notre climat manque d'ensoleillement direct pour permettre des tests de longue durée. Nous avons réussi à produire des kWh d'origine solaire, ce qui constitue une réelle avancée au niveau mondial pour les petites puissances et la gamme de température de 130 à 150 °C, mais la phase de rapprochement avec un industriel pour la reprise du projet nous paraît encore bien loin. L'année 2002 devra impérativement, en cas de poursuite, voir une entrée de l'industrie, que nous avons souhaitée depuis 2000.
 4. L'aboutissement du projet de stockage pour la SUVA a été un grand motif de satisfaction après 4 années d'effort pour promouvoir la solution. Un an de recherches pour un projet sans pompe à chaleur n'a pas encore été couronné de succès. Un espoir subsiste, pour le début 2002, de trouver un maître d'ouvrage intéressé, faute de quoi, nous clôturerons la filière, faute de marché.
 5. Notre recherche appliquée sur la zéolithe a débuté. Nous n'en sommes qu'au début. Le matériau pourrait cependant se révéler difficile à dompter et son rapport prix/capacité de stockage pourrait être *in fine* prohibitif.
- Les projets P+D en matière de stockage restent peu nombreux et ce depuis 1999, le marché des grandes constructions étant en sommeil.
- L'année 2002 devrait être marquée par les résultats de la Tâche 26 du programme SHC de l'AIE, et un éclairage de la direction à prendre avec la zéolithe. Un projet de stockage sans pompe à chaleur serait également bienvenu pour que les connaissances accumulées en 20 ans ne s'évaporent pas petit à petit, faute d'investissements du marché dans les techniques de production d'énergie thermique solaire à grande échelle, dépassant le stade de la villa.
- Le site Internet du programme de recherche et du programme P+D devrait être ouvert début 2002 [27].

Liste des projets de R+D

(RA) Rapport annuel 2001 existant

(RF) Rapport final existant

ENET: numéro de commande du rapport chez [ENET](#)

les rapports peuvent être téléchargés à partir du site Internet donné

Solaire actif - chaleur

- [1] C. Müller-Schöll, U. Frei, SPF/HS-*Rapperswil*. **SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie 1997 – 2001, Teil A : Komponenten in solarthermischen Systemen** (RA), www.solarenergy.ch; www.solarenergy-thermal.ch
- [2] P. Vogelsanger, B. Menzi, U. Frei, SPF/HS-*Rapperswil*. **SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie 1997 – 2001, Teil B : thermische Solarsysteme** (RA) www.solarenergy.ch; www.solarenergy-thermal.ch
- [3] S. Brunold, U. Frei, SPF/HS-*Rapperswil*. **SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie 1997 – 2001, Teil C: Materialien in thermischen Systemen** (RA) www.solarenergy.ch; www.solarenergy-thermal.ch
- [4] S. von Rotz, J. Marti, T. Gronowski, U. Frei, SPF/HS-*Rapperswil*. **SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie 1997 – 2001, Teil D : Informatik und Software** (RA) www.solarenergy.ch; www.solarenergy-thermal.ch

- [5] A. Gherbi, O. Renoult, J. Bony, D. Gillet, Ph. Dind, Laboratoire d'automatique EPF-*Lausanne* et Laboratoire d'énergétique solaire de l'EIVD *Yverdon* : **Optimisation d'installations solaires combinées** (RA), <http://iawwww.epfl.ch>; <http://iaw2.epfl.ch>; www.eivd.ch;
- [6] S. Martin, M. Kane, D. Favrat, LENI/EPF-*Lausanne*: **SPS : mini-centrale pilote électro-thermo-solaire de 10 kW_{el}, Phase 3 : Partie A Centrale solaire hybride**, (RF) décembre 2001, <http://leniwww.epfl.ch/publications>
- [7] Y. Allani, C. Pécoud, J.-S. Thély COGENER, *Lausanne*: **SPS : mini-centrale pilote électro-thermo-solaire de 10 kW_{el}, Phase 3 : Comportement du capteur CEP** (RF en 2002) www.cogener.ch/sps_index.htm
- [8] J.-M. Suter, Suter Consulting, *Berne* : **IEA SHC Task 26 Solarcombisystems – Participation and Subtask A leading** (RA), www.iea-shc.org/task26/index.html; www.energy-research.ch
- [9] J. Remund, S. Kunz, Meteotest, *Berne* : **Project SODA : Integration and exploitation of networked solar radiation** (RA), <http://soda.jrc.it/public/partners.html>

Stockage de chaleur

- [10] P. Gantenbein, S. Brunold, U. Frei, SPF/HS-*Rapperswil*: **Sorptionsspeicher. Phase 1 : Aufbau und Inbetriebnahme einer Laboranlage** (RA), www.solarenergy.ch
- [11] P. Hartmann, H. Juzi, ZHW, *Winterthur*: **Akquisition eines Demonstrationsprojektes Saisonale Speicherung von Sonnenenergie im Erdboden** (RA), www.zhwin.ch
- [12] 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)
- [13] 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)

Liste des projets P+D

Solaire actif – chaleur

- [14] Liste des projets P+D acceptés en 2001 :

N° 81632 Zirkulationseinbindung von solaren Warmwasseranlagen in MFH (pré-étude)
 N° 81689 Réfrigérateur solaire à adsorption (prototype, volume réfrigéré 100 litres)
 N° 82708 Drain-Down System für grosse Solaranlagen (projet pilote, mesures, 4 x 40 m²)
 N° 82711 Drain-Back-Kompaktanlagen (mesures sur 5 configurations différentes, <16 m²)

Stockage de chaleur

- [15] D. Pahud, SUPSI-DCT-LEEE *Canobbio* : **Étude pilote pour le stockage diffusif des bâtiments du Centre D4 de la SUVA à Root (LU). Analyse de 2 tests de réponse géothermique et intégration du stockage diffusif dans le système** (Projet P+DB, RF), déc. 2001
- [16] B. Keller, P. Berchtold, D. Pahud : **Unternehmens- und Innovationszentrum D4 in Root (LU) Grösster saisonaler Diffusionspeicher der Schweiz** (Projet P+DB). Géothermie CH. Bulletin SVG / SSG Nr. 31, nov. 2001. pp 2-7
- [17] H. SCHÄR, *St Gallen*: **Erdspeicheranlage für das Weiterbildungszentrum Hochschule St. Gallen** (RA non reçu)
- [18] F. Fleury, *Épalinges* : **Villa solaire avec stockage saisonnier en molasse** (RA non reçu)

- [19] P. Léchaire, *Les Brenêts*: **Maison solaire avec stockage saisonnier central chauffé par capteurs à air** (RA)
- [20] P. Hollmüller, B. Lachal, CUEPE *Genève*: **Projet COSTEAU: Collecteurs souterrains à eau pour chauffage et rafraîchissement** (RA)

Références

- [21] S. Dupasquier, EPFL-*Lausanne*: **Contribution à l'étude du comportement thermo-hydraulique du stockage saisonnier de chaleur en aquifère, EPF-Lausanne**, Thèse de doctorat ès sc., 2001
- [22] D. Pahud, SUPSI-DCT-LEEE *Canobbio* : **Two response tests of two identical boreholes drilled to a depth of 160 m near Lucerne**, European Workshop on geothermal response tests, EPF Lausanne, October, 2001
http://leee.dct.supsi.ch/leee-urec/RapPDF/Borehole_heat_exchanger_systems.htm
- [23] P. Hartmann, H. Juzi, ZHW, *Winterthur*: **Sommersonne für den Winter speichern – ein Traum ?** Schweizer Ingenieur und Architekt, SI+A, Nr. 14/2000
- [24] G. Branco, B. Lachal, P. Gallinelli, D. Gonzalez, W. Weber, CUEPE *Genève*: **Analyse thermique de la cité solaire à Plan-les-Ouates (GE)**, 120 pages, RF 2001, à paraître en 2002
www.unige.ch/cuepe/recherche.htm
- [25] O. Renoult, J. Bony, Ph. Dind, Laboratoire d'énergétique solaire de l'EIVD *Yverdon* : **Résultats d'une campagne de mesures in situ d'une installation solaire combinée** (RF intermédiaire), août 2001
- [26] S. Martin, M. Kane and D. Favrat, LENI-EPF-*Lausanne* : **Small hybrid solar power system : First FIELD test results**, 1st International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics , April 2002, Kruger Park, South Africa
- [27] **Site Internet du programme de recherche et P+D**: www.solarenergy-thermal.ch Rubrique: Programme de recherche/rapports *Berichte*: les rapports annuels sont disponibles au téléchargement. Le site est aussi accessible depuis www.solarch.ch/
- [28] J.-C. Hadorn, Ing-Conseil : Programme Solaire actif – Chaleur **Rapport annuel 1998, 1999, 2000**, OFEN
- [29] J.-C. Hadorn, Ing-Conseil : Programme Stockage de chaleur **Rapport annuel 1998, 1999, 2000**, OFEN

PHOTOVOLTAIK

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2001

Stefan Nowak

stefan.nowak.net@bluewin.ch



Mobicat:

Nachhaltige Mobilität mit dem weltgrössten, solar-elektrisch angetriebenen Passagierschiff

Dieses Schiff mit einer Länge von 33 m und einer Breite von 11 m bietet Platz für 150 Personen. Die elektrische Energie wird mit einer autonomen 20-kWp-Photovoltaik-Anlage erzeugt. Fast lautloses Dahingleiten bei niedrigstem Energieverbrauch zeichnet dieses Schiff aus. (Bildquelle: NET AG)

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Jahr 2001 war für das Programm Photovoltaik (PV) insgesamt durch eine Konzentration auf anwendungs- und marktorientierte Projekte im nationalen wie im internationalen Rahmen gekennzeichnet. Geprägt durch die nationale sowie die internationale Photovoltaik-Marktsituation fand auch eine Konsolidierung bestimmter Aktivitäten statt: Während einzelne mehr exploratorische und damit langfristige Projekte in ihrer Priorität eher zurückgestuft wurden, fanden umsetzungsorientierte und mehr kurzfristige Aktivitäten einen Aufschwung. Die Zusammenarbeit mit privaten Unternehmen konnte dabei weiter intensiviert werden. Besonders hervorzuheben sind die fortschreitenden Arbeiten zur Umsetzung im Bereich der Dünnschicht-Solarzellen. Laufende Aktivitäten in Forschung und Entwicklung sowie Pilot- und Demonstrationsanlagen umfassen im Berichtsjahr rund 80 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 [36] 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, Nieder-Bandgap), Zellen auf der Grundlage von **Verbindungshalbleitern** (CIGS, CdTe) sowie **Farbstoffzellen**. In allen Technologien fanden die Bestrebungen zur Umsetzung ihre Fortsetzung und einzelne Projekte konnten mit privaten Unternehmen konkretisiert werden.

Module und Gebäudeintegration

Die **Integration der Photovoltaik** im bebauten Raum bildet weiterhin den wichtigsten Schwerpunkt der angestrebten Anwendungen. Für kommerzielle Solarmodule mit fortgeschrittenen Montagesystemen an Flachdach, Schrägdach und Fassaden wurde eine ansprechende Ästhetik bei tieferen Kosten realisiert; mittelfristig wird eine weiterführende Integration von Dünnschicht-Solarzellen in Gebäudebauteile angestrebt.

schicht-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. Die **Standardisierung** von Produkten und Systemen und die dazugehörigen **Normen** stellen demgegenüber ein Gebiet dar, welches angesichts der fortschreitenden Marktpenetration der Photovoltaik hohe Dringlichkeit hat. Dies trifft sowohl für netzgekoppelte Systeme wie für Inselanlagen zu. Für letztere 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 sowie 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.

Institutionelle internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit bildet ein zentrales Standbein in allen Bereichen. Der Anschluss an die internationale Entwicklung sowie ein intensiver Informationsaustausch war im Berichtsjahr ein wichtiges Ziel, welches im Rahmen der internationalen Programme der **EU** sowie der **IEA** mit Kontinuität weiterverfolgt wurde. Auch hier findet eine Konsolidierung der Aktivitäten mit einer zunehmend marktorientierten Strategie statt. Für Photovoltaik-Anwendungen in Entwicklungsländern galt es, eine bessere Integration in die internationalen Bemühungen und Netzwerke zu bewerkstelligen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

ZELL-TECHNOLOGIE

Die **grosse Bandbreite der Schweizer Solarzellenforschung** konnte im Berichtsjahr 2001 mit Unterstützung verschiedenster Institutionen fortgesetzt werden. Erfreulicherweise erfolgen grundlegende Arbeiten vermehrt auch im Programm *TOP NANO 21* von KTI und ETH-Rat. 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.

Silizium

Im Berichtsjahr setzte das IMT an der Universität Neuchâtel die Hauptaktivität bei den **mikromorphen Solarzellen** [1a] mit Schwerpunkt auf industriell relevanten Produktionsschritten und –prozessen fort (Fig. 1). 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 10 \AA/s erhöht werden. Andererseits konnte für einfache amorphe Zellen in der p-i-n Schichtabfolge der Anfangswirkungsgrad auf 10,6% verbessert werden. Für p-i-n/p-i-n mikromorphe Zellen wurde ein Anfangswirkungsgrad von 12,3% realisiert. Die gute Qualität des hauseigenen TCO auf der Basis von ZnO konnte durch spektrale Messungen bestätigt werden. Für die n-i-p Schichtabfolge wurden zwei neue Schichten für den Rückkontakt entwickelt und bezüglich ihrer Lichtstreuung charakterisiert. In dieser Konfiguration erreichten die mikromorphen Tandemzellen einen Anfangswirkungsgrad von 9,6%. Die Arbeiten an den mikromorphen Solarzellen konnten im Berichtsjahr durch das neue EU-Projekt **DOIT** [1b] ergänzt werden. 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. Der entsprechende Reaktor konnte im Berichtsjahr realisiert und erste Schichten mit einer Homogenität von besser als 10% deponiert

werden. Im Projekt **ASOLANT** [1c] wurde mit Unterstützung der ESA ein realitätsnaher Prototyp einer Satellitenantenne mit integrierten Solarzellen auf Kunststoffsubstraten hergestellt. Mit einem speziellen Design konnten die Parameter der einzelnen Module ($V_{oc} = 6,36 \text{ V}$, $I_{sc} = 55,8 \text{ mA}$, $FF = 0,554$) gemäss den gestellten Anforderungen realisiert werden. Das im Berichtsjahr abgeschlossene Projekt konnte damit die grundsätzliche Möglichkeit der Nutzung von dünnen Silizium-Solarzellen in Satellitenantennen aufzeigen.

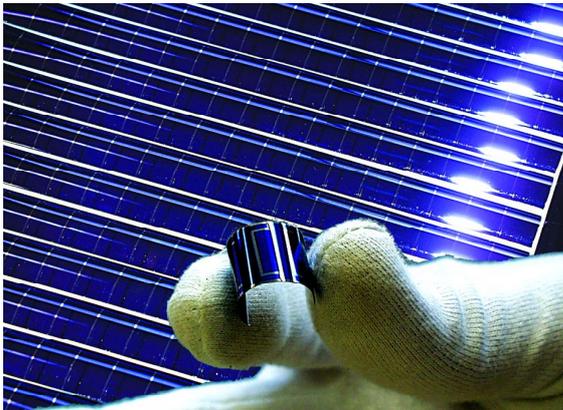


Figur 1: Plasmareaktoren am IMT, (Bildquelle: IMT)

Das KTI-Projekt zwischen dem CRPP an der EPFL, dem IMT und Unaxis einer **grossflächigen, schnellen Beschichtungsanlage** [2] für Silizium-Dünnschichtsolarzellen wurde im Berichtsjahr fortgesetzt. Nebst der am CRPP vorhandenen Unaxis Plasma-Beschichtungsanlage wurde am IMT eine ähnliche Anlage aufgebaut. Damit können am CRPP die grundlegenden Prozessaspekte untersucht und am IMT die Solarzellen bezogenen Arbeiten durchgeführt werden. Nebst der Konfiguration der Reaktorelektroden stehen besonders auch Fragen der Prozesskontamination in einem Einkammersystem im Vordergrund. Es konnten in diesem Reaktor erste Solarzellen hergestellt werden.

Das KTI-Start-up Projekt zwischen der Fachhochschule Le Locle und der VHF-Technologies zur Entwicklung eines **kontinuierlichen (roll-to-roll) Fabrikationsprozesses** [3] von amorphen Solarzellen auf Kunststoffsubstraten wurde im Berichtsjahr erfolgreich abgeschlossen. Mit einer in-situ Abscheidung sämtlicher Schichten konnte auf einem 30 m langen, 30 cm breiten Polyimidsubstrat bei einer Beschichtungskapazität

von 2000 m²/Jahr ein Wirkungsgrad von 3 – 4 % erreicht werden (Fig. 2).



Figur 2: Flexible Solarzellen von VHF-Technologies, (Bildquelle: VHF-Technologies)

Das Projekt am PSI zur Entwicklung von **Nieder-Bandgap-Zellen** für Anwendungen der Thermophotovoltaik [4a] wurde im Berichtsjahr fortgesetzt. Die Arbeiten bezüglich der photovoltaischen Zelle konzentrierten sich dabei auf grundlegende Aspekte von SiGe Quantum Well Strukturen, welche in einem UHV-CVD Reaktor hergestellt wurden.

II-VI Verbindungen (CIGS, CdTe)

In der Gruppe Dünnschichtphysik an der ETHZ wurden verschiedene EU-Projekte zum Thema Solarzellen auf der Basis von Verbindungshalbleitern fortgesetzt: Das EU-Projekt **CADBACK** [5a] geht der Frage der Optimierung des Rückkontaktes weiter nach: Mit Pufferschichten von Sb oder Sb₂Te₃ und Mo Metallschichten als Rückkontakt erreichten die CdTe-Zellen einen Wirkungsgrad von ungefähr 12%. Mit beschleunigten Alterungsmessungen konnte eine gute Stabilität nachgewiesen werden. Das Projekt wurde Ende 2001 abgeschlossen. Das EU-Projekt **FLEXIS** [5b] für CIGS-Zellen auf flexiblen Substraten (Polyimid) wurde im Berichtsjahr ebenfalls abgeschlossen. In Ergänzung zur früher im Projekt verwendeten einstufigen Deposition im *lift-off* Verfahren konnten mit einem 3-Stufenprozess bei einer tieferen Temperatur von 450 °C (Abscheidung vorläufig auf Glas) ein Wirkungsgrad von 14% erzielt werden. Im neuen EU-Projekt, **PROCIS** [5c], werden produktionsrelevante Aspekte für CIGS-Zellen auf grösserer Fläche entwickelt: reduzierte Depositionstemperaturen und Pufferschichten (z.B. CdS, ZnS, ZnSe), welche mit Vakuumprozessen kompatibel sind. Erste Versuche mit CdS-Schichten mittels PVD (Physical Vapor

Deposition) sind positiv verlaufen. Mit der Alternative ZnS resultierten hingegen noch weniger gute Ergebnisse. Die Schichteigenschaften mit dem 3-Stufenprozess aus dem Projekt FLEXIS wurden in PROCIS weiter auf ihre Struktur untersucht.

Im neuen Projekt **NANOCIS** [5d] innerhalb des Programms TOP NANO 21 werden neue Prozesse für CIGS-Zellen auf der Grundlage von Nanopartikeln angestrebt. Damit soll die Möglichkeit von vereinfachten und damit kostengünstigeren Herstellungsprozessen aufgezeigt werden. In einem ersten Schritt wurden die einzelnen Schichten mittels geeigneter *precursors* hergestellt und strukturell charakterisiert.

Farbstoffzellen

Die weitere Entwicklung von farbstoffsensibilisierten, **nanokristallinen Solarzellen** [6a] wurde am ICP der EPFL fortgesetzt. Im Berichtsjahr wurden die Arbeiten an festen Hetero-Übergängen vorangetrieben, wobei photovoltaische Zellen hergestellt werden konnten. Diese Arbeiten sind nun ebenfalls Bestandteil eines Projektes innerhalb des Programms TOP NANO 21 [6b]. Zusammen mit Greatcell Solar werden in einem weiteren Projekt von TOP NANO 21 **Innenraum-Anwendungen** [6c] der Farbstoffzelle entwickelt. In einem PSEL-Projekt werden die **Freiluftmessungen** [6d] an farbstoffsensibilisierten Solarzellen fortgesetzt, welche das Verhalten dieser Zellen unter realen Aussenbedingungen beschreiben sollen. Von besonderem Interesse ist das Verhalten unter UV-Strahlung. Erste Messungen unter Freiluftbedingungen wurden am PSI durchgeführt.

Solaronix hat im EU-Projekt **LOTS-DSC** die Arbeiten zur Langzeitstabilität [7] von Farbstoffzellen abgeschlossen. Die Resultate zeigen, dass die Stabilität dieser Zellen im UV-Licht stark vom Elektrolyten abhängig ist und durch Additive verbessert werden kann; thermische Zyklen bis 60 °C resultieren in einer hochgerechneten Lebensdauer von mindestens 5 Jahren unter Aussenbedingungen. Dieses Resultat ist ein erster Schritt in Richtung eines Solarmoduls für Aussenanwendungen über eine Lebensdauer von mehr als 20 Jahren.

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

Das EU-Projekt **PV en face!** [9a] am LESO der EPFL für neue Lösungen zur Fassadenintegration wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Nachdem die Konzept- und Designphase für das Produkt *Solface* im Vorjahr abgeschlossen werden konnte, konzentrierte man sich auf die Umsetzung. Es fanden dazu Verhandlungen mit zwei Schweizer Metallbauunternehmen statt, welche an diesen Anwendungen Interesse gezeigt hatten. Eine erste Fassade (Fig. 3) wurde am DEMOSITE der EPFL aufgebaut. Der nächste Schritt ist, eine geeignete Fassade für ein Pilotprojekt zu finden.



Figur 3: Photovoltaik Fassade Solface (Demosite) (Bildquelle: LESO / EPFL)

Das Projekt **DEMOSITE** [9b] zeigt nebeneinander zahlreiche Varianten der Photovoltaik-Gebäudeintegration auf Flachdächern, Schrägdächern und Fassaden. Als internationales Projekt ist es in Task 7 des IEA PVPS eingebettet. Aufgrund der Möglichkeiten zum praxisnahen Vergleich konnten verschiedene Produkte bzw. Lösungen im Verlauf des Projektes angeregt oder verbessert werden. Im Berichtsjahr wurden erneut vier neue Stände eingereicht: Solgreen II, Solface (Fig. 3), Freestyle (Fig. 4) und Kawner. Das Projekt und detaillierte Informationen dazu können über Internet (www.demosite.ch) abgerufen werden. Unter Verwendung des Internets soll auch die Weiterbildung mit einem Kurs zur Photovoltaik Gebäudeintegration vorangetrieben werden.

Enecolo beteiligte sich weiterhin am EU-Projekt **ENERBUILD** [10], welches als thematisches

Netzwerk (www.enerbuild.net) 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 die laufenden Arbeiten zur Photovoltaik Gebäudeintegration in Europa zusammengestellt und daraus erste Vorschläge für künftige Strategien und den Handlungsbedarf abgeleitet.



Figur 4: Photovoltaikdach Freestyle (Demosite), (Bildquelle: LESO / EPFL)

Das EU-Projekt **HIPERB** [11] wurde in der Schweiz nach dem Konkurs von *Atlantis* durch die Nachfolgefirma *Swiss Sustainable Systems* fortgesetzt. Es strebt die Verwendung von CIGS-Zellen in Photovoltaik Dach- und Fassadensystemen an und konkretisiert damit die Integration dieser Dünnschicht-Technologie in der Photovoltaik Gebäudeintegration.

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

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 wach-

sendem Markt noch keine verbindlichen Normen vorliegen.

Das LEEE-TISO an der SUPSI setzte im Berichtsjahr die neuste Projektphase zur **Qualitätssicherung und Energieertrag von Photovoltaik Modulen** [12a] fort. Der 7. Testzyklus an insgesamt 17 Solarmodulen wurde abgeschlossen und eine 8. Messserie an 12 weiteren Modultypen (4 mc-Si, 5 pc-Si, 2 a-Si, 1 CIS) begonnen. Die Messprozedur wurde angepasst, um die Degradation innerhalb der ersten Betriebsstunden zu berücksichtigen. Die detaillierten Messungen beginnen fortan nach einer Anfangsenergie von 20 kWh/m². Der im Vorjahr installierte Sonnen-Simulator der Klasse A wurde durch eine akkreditierte Stelle gemäss ISO 17025 für Messungen der I-V Kennlinie bei 1000 W/m² Einstrahlung und 25 °C zertifiziert, was Messungen entsprechend der Norm IEC 60904-1 erlaubt. Die Genauigkeit liegt bei $\pm 2,0\%$ und es wurden im Berichtsjahr insgesamt ca. 1000 Modulmessungen durchgeführt, wovon 10% für externe Kunden. Die Messungen an den 3 Photovoltaik Anlagen des TISO wurden fortgesetzt. Mit den *LEEE News* [37] wird neu ein Newsletter mit aktuellen Ereignissen und Resultaten publiziert. Das TISO wurde 2001 für seine langjährigen Photovoltaikarbeiten mit dem Schweizer Solarpreis ausgezeichnet.

Im EU-Projekt **MTBF-PV** [12b], welches das TISO zusammen mit der Europäischen Prüfstelle ESTI in Ispra durchführt, erfolgten ausführliche Messungen mit dem Sonnen Simulator an 252 Modulen der inzwischen bald 20 Jahre alten Anlage (10 kWp, 1982) am TISO. Bemerkenswert ist, dass trotz visuellen Veränderungen der Module (Vergilbung, Delaminationen, usw.) 59% davon eine Leistungsabweichung von weniger als – 10% der spezifizierten Leistung aufweisen. Diese Feststellung lässt darauf schliessen, dass die Mehrheit der Module nach 20 Jahren die Herstellerangaben erfüllt. Detaillierte Untersuchungen erfolgten an einzelnen Zellen und Modulen mittels I-V Kennlinien, IR Analyse und beschleunigten Alterungsmessungen.

Das PSI setzte seine Messungen [4b] unter **realen Betriebsbedingungen** fort; aufgrund der ausführlichen Analyse kann der Energieertrag von Photovoltaik-Modulen unter Teillastverhalten parametrisiert werden. Dieses Thema soll im Frühling 2002 innerhalb eines durch Enecolo organisierten **Workshops** [10b] vertieft werden.

Am Photovoltaiklabor an der HTA-Burgdorf wurde das Projekt über das **Langzeitverhalten von netzgekoppelten Photovoltaik Anlagen** [13a]

mit Unterstützung der Gesellschaft Mont Soleil, der Localnet AG und Elektra Baselland sowie des BFE fortgesetzt. Im Projekt werden 38 Anlagen mit 51 Wechselrichtern überwacht. Im Berichtsjahr konnte auch die 560-kWp-Anlage auf dem Mont-Soleil im Feinmessprogramm der HTA Burgdorf aufgenommen werden. Die in den letzten Jahren laufend beobachteten Verbesserungen in der Wechselrichter-Verfügbarkeit dürfte aufgrund der Messungen den Zenit erreicht haben. Nach Abschluss des EU-Projektes **PV-EMI** [13b] im Vorjahr hat das PV-Labor an der HTA-Burgdorf einige Anschlussarbeiten ausgeführt. So wurde die im Projekt vorgeschlagene DC-Netznachbildung realisiert und auf den Experimenten aufbauend ein weiterer Vorschlag zur Impedanz in dieser Netznachbildung formuliert. Ausserdem wurde an der HTA-Burgdorf ein 25 kW Photovoltaik-Generator-Simulator für Wechselrichterprüfungen aufgebaut (Fig. 5).



Figur 5: PV-Generator-Simulator 25 kW (Bildquelle: HTA-Burgdorf)

Im neuen EU-Projekt **INVESTIRE** [14] wirkt Dynatex zusammen mit 19 weiteren Unternehmen und 15 Forschungslabors an einer breiten Evaluation von Speichertechnologien für erneuerbare Energien und speziell Photovoltaik-Inselanlagen mit. Mit insgesamt 9 Speichertechnologien werden die wichtigsten Batterietypen (Blei, Lithium, Nickel, Metall-Luft) sowie alternative Speicherverfahren (Supercaps, Elektrolyse/Wasserstoff/Brennstoffzelle, Schwungrad, komprimierte Luft, Redox Systeme) erfasst und bezüglich ihren Anwendungsbedingungen charakterisiert. Daraus wird das Entwicklungspotential und der Handlungsbedarf für die Zukunft ermittelt.

ERGÄNZENDE PROJEKTE UND STUDIEN

Das EU-Projekt **PVSAT** [10b] zur Fernüberwachung von Photovoltaik-Anlagen wurde von Enecolo und den europäischen Projektpartnern

im Berichtsjahr abgeschlossen. Dabei wurde das im Lauf des Projektes entwickelte Verfahren an über 50 Photovoltaik Anlagen in Holland, Deutschland und der Schweiz validiert. Für 60% der Anlagen konnte zwischen vorhergesagtem und tatsächlichem Ertrag eine Abweichung innerhalb $\pm 10\%$ eingehalten werden. Die Gründe für Abweichungen von mehr als 10% sind vielfältig und konnten zum Teil eruiert werden. Das Verfahren soll nun von einem Photovoltaik-Hersteller zur Qualitätssicherung genutzt werden.

Meteotest beteiligt sich am EU-Projekt **SoDa** [15], welches weltweite Solardaten per Internet vermitteln will (<http://soda.jrc.it>). Dazu werden entsprechende Algorithmen auf der Grundlage des Europäischen Strahlungsatlas ESRA, sowie Meteoronorm [38] und Satellight [39] entwickelt.

Das CUEPE an der Universität Genf beteiligt sich am EU-Projekt **Heliosat 3** [16] zur energiespezifischen Bestimmung der Solarstrahlung von Meteorosat-Daten.

Die systemorientierten Arbeiten zur **Thermophotovoltaik** [4a] wurden am PSI fortgesetzt. Im Berichtsjahr wurden die verschiedenen Komponenten in einem kleinen sowie einem grossen 20-kW-Prototyp-Brenner weiter untersucht und durch ein Simulationsmodell beschrieben. Diese Arbeiten wurden durch Kostenabschätzungen ergänzt. Für die Anwendungen steht der autonome Betrieb (elektrische Versorgung) eines Heizkessels im Vordergrund.

Im EU-Projekt **MSG: Multi-user solar hybrid grids** [17] wurden an der Universität Zürich die sozialwissenschaftlichen Aspekte einer Solarstromversorgung in netzfernen Dörfern weiter verfolgt. Im Berichtsjahr wurde ein Simulationsmodell zum sozialen Verhalten den Projektanforderungen angepasst. Es findet eine Wechselwirkung zwischen den physikalischen Daten (insbesondere Ladungszustand der Batterien) und dem sozialwissenschaftlichem Modell statt.

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 übernahm im Berichtsjahr nach Italien und Holland den 3. Vorsitz dieses weltweiten Programms. Eine Vielzahl von Berichten und Publikationen zu diesem Programm können von der

website www.iea-pvps.org abgerufen werden. Das Berichtsjahr 2001 war aus Sicht von IEA PVPS insgesamt sehr produktiv.

Nova Energie vertritt die Schweiz in Task 1 des IEA PVPS, welches allgemeine **Informationsaktivitäten** [18] zur Aufgabe hat. Im Berichtsjahr wurde ein weiterer nationaler Bericht über die Photovoltaik in der Schweiz bis 2000 [40] erstellt; auf dieser Grundlage wurde die 6. Ausgabe des jährlichen internationalen Berichtes über die Marktentwicklung der Photovoltaik in den IEA-Ländern erstellt [41]. Dieser Bericht ist inzwischen eine vielzitierte Referenz über die Entwicklungen und Trends im Photovoltaik-Markt der IEA-Länder. Der IEA PVPS-Newsletter [42] informiert regelmässig über die Arbeiten in und rund um das IEA-Programm. Ein neuer Bericht zum Thema Mehrwert durch Photovoltaik-Anlagen (*added values of photovoltaic power systems*) wurde im Berichtsjahr fertiggestellt [43].

In Task 2 über **Betriebserfahrungen** [19] stellt TNC den Schweizer Beitrag. Die PVPS-Datenbank *Performance Database* [44] mit Daten von 256 Photovoltaik-Anlagen aus 11 Ländern (insgesamt mehr als 8'000 Monats-Betriebsdaten) wurde im Berichtsjahr international verteilt. Verhalten, Zuverlässigkeit und Dimensionierung von Photovoltaik-Anlagen waren die Themen eines Workshops [45], welcher im Rahmen dieses Projektes an der 17. Europäischen Photovoltaik Konferenz in München erfolgreich durchgeführt wurde.

Dynatex beteiligt sich an den Arbeiten in Task 3 über **Inselanlagen** [14]. Schwerpunkte der Aktivitäten dieses Projektes bilden die Qualitätsverbesserung und die Zuverlässigkeit von autonomen Photovoltaik-Anlagen sowie technische Fragen in hybriden Systemen und Batterien. Im Berichtsjahr wurde eine Reihe von Berichten weiterbearbeitet, sodass die Endfassungen dazu im Verlauf des Jahres 2002 vorliegen sollten.

Das ewz stellt den Schweizer Beitrag in Task 5 zu technischen Fragen der **Netzankoppelung** [20] von Photovoltaik-Anlagen. Dieses Projekt wird in nächster Zeit mit einer Reihe von Schlussdokumenten abgeschlossen. Über die Richtlinien zur Netzanbindung von Photovoltaik-Anlagen, die Inselbildung, grössere Anzahl von PV-Systemen in einem Versorgungsnetz und dem entsprechenden maximalen Volumen liegen eine Fülle von nützlichen Informationen vor, welche zum Teil auch für andere dezentrale Energiesysteme von Bedeutung sind. Im Januar 2002 fand in

Holland ein abschliessender internationaler Workshop [46] statt.

Task 7 zur **Integration der Photovoltaik in den bebauten Raum** [10d] wird von Enecolo betreut. Eine Datenbank mit 450 Projekten zur Gebäudeintegration kann unter www.task7.org eingesehen werden. Produkte und Anwendungen der Photovoltaik im bebauten Raum werden in einer neuen Datenbank zugänglich gemacht: www.pvdatabase.com. Im Berichtsjahr wurde ein Bericht zu Anwendungen in *non-building structures* [47] publiziert. Auch IEA PVPS Task 7 schliesst in nächster Zeit mit einer Reihe von weiteren Schlussdokumenten ab, wobei 15 besondere Projekte als Fallstudien zusammengestellt werden. Ein neues Buch zur Gebäudeintegration der Photovoltaik [48] stellt die aktuellsten Erkenntnisse aus diesem Gebiet zusammen. Task 7 kann für sich in Anspruch nehmen, das Thema der Photovoltaik-Gebäudeintegration um viele Aspekte bereichert zu haben. Nach dem Abschluss dieses Projektes diskutiert das IEA PVPS ExCo zur Zeit eine Fortsetzung der allgemeinen Thematik der Photovoltaik-Gebäudeintegration in einem neuen Task 10. Dabei soll nicht einfach Task 7 fortgesetzt werden, sondern die notwendigen Fragestellungen und Expertisen sowie die Arbeitsgebiete in einem neuen Prozess definiert werden.

Im Rahmen des Projektes *Drehscheibe Photovoltaik Entwicklungszusammenarbeit* leistet Entec mit Unterstützung des Staatssekretariats für Wirtschaft (seco) den Schweizer Beitrag zu Task 9 über die **Photovoltaik-Entwicklungszusammenarbeit** [21]. Inzwischen liegen für verschiedene Arbeitsgebiete fortgeschrittene Entwürfe

zu den Endpublikationen vor. Die Arbeiten zur Formulierung von Empfehlungen in Hinsicht auf die Anwendung der Photovoltaik in Entwicklungsländern konnten damit grosse Fortschritte erzielen, und erste definitive Resultate sollten im Verlauf von 2002 vorliegen. Die Schweiz ist in diesem Projekt für die Koordination der Arbeiten mit multilateralen und bilateralen Organisationen verantwortlich. Im nationalen Rahmen wird angestrebt, die Schweizer Photovoltaik vermehrt in dieses wichtige Gebiet einzubringen. Dazu wurde im Berichtsjahr mit Unterstützung des BUWAL, des seco und der DEZA, ein nationaler Workshop *Photovoltaik Entwicklungszusammenarbeit* (PV EZA) durchgeführt. Die Initiative für Projekte der PV EZA mit Schweizer Beteiligung soll durch konkrete Beispiele und die Nutzung internationaler Projektfonds (z.B. Global Environmental Facility – GEF, oder Solar Development Group – SDG) gefördert werden. Das BUWAL unterstützt dabei ein diesbezügliches Pilotprojekt [21].

Alpha Real vertritt die Schweiz im TC 82 der IEC und leitet die Arbeitsgruppe, welche internationale **Normenvorschläge** [22a] für Photovoltaiksysteme vorbereitet und verabschiedet. Alpha Real beteiligt sich ausserdem an **PV-GAP (PV Global Approval Program)** [22b], einem weltweiten Programm zur Qualitätssicherung und Zertifizierung von Photovoltaik-Systemen. Im Berichtsjahr konnten Fortschritte erzielt werden in Bezug auf eine wachsende Akzeptanz von PV-GAP in der Industrie und in Finanzkreisen. Differenzen bestehen dagegen zwischen Exponenten von IEC und PV-GAP, welche teilweise die Umsetzung der notwendigen Massnahmen zur Normierung und Qualitätssicherung verzögern.

Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr wurde die vielfältige nationale Zusammenarbeit anlässlich von Projekten und Veranstaltungen weiter gepflegt. In Zusammenarbeit mit privaten Unternehmen konnten wiederum neue Projekte in Angriff genommen werden und das Interesse an der Photovoltaik hält auch bei einem gedämpften Schweizer Markt an, wobei zum Teil eine Bereinigung der zahlreichen Akteure zu beobachten ist: Einzelne Akteure suchen vermehrt Kooperationen mit ausländischen Partnern. Allgemein ist eine vermehrte Ausrichtung auf den internationalen Markt festzustellen. Themenspezifische Workshops haben auch in diesem Jahr den Austausch gefördert.

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 (insbesondere dem Programm Top Nano 21), dem BUWAL, der DEZA und dem seco sowie dem VSE, dem PSEL und der Gesellschaft Mont Soleil. Insgesamt konnte dadurch die Projektstätigkeit im Programm Photovoltaik noch breiter abgestützt werden.

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 Zusammenarbeit innerhalb der EU mit vielen Projekten fortgesetzt werden: Im Jahr 2001 waren es 16 Projekte in der Forschung und 4 Projekte im Programm Energie der EU. Weitere Projekte finden in den Programmen Altener, mit der ESA und im Programm IST der EU statt. Leider wurde die Ratifizierung der bilateralen Verträge mit der EU weiter verzögert, sodass die erhoffte Besserstellung von Schweizer Gruppen in EU-

Projekten immer noch nicht möglich ist. Mit den verantwortlichen Stellen in Brüssel wird dennoch ein intensiver Austausch gepflegt. Ein neues EU-Projekt **PV-EC-NET** [21c] wird ab 2002 die verschiedenen nationalen Photovoltaik-Programme noch besser vernetzen. 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



Figur 6: Dachintegration mit SOLRIF, Hedingen, (Bildquelle: NET AG)

Insgesamt waren im Jahr 2001 im Photovoltaik rund **45 P+D-Projekte aktiv**. Dazu befanden sich anfangs 2002 wie gewohnt diverse Projekte in der näheren Abklärung. Die P+D-Aktivitäten verteilten sich auf die Bereiche Pilotanlagen, Studien und Hilfsmittel, Komponentenentwicklung und Messkampagnen. Die pilotmässige Erprobung neuer Komponenten bei P+D-Anlagen im Massstab 1:1 wurde im Vergleich zum letzten Jahr nochmals gestärkt und bildete einen klaren Schwerpunkt. Zuwachs war vor allem im Bereich der **gebäudeintegrierten Photovoltaikanlagen** zu verzeichnen. Rund 2/3 aller Projekte behandelten im Berichtsjahr den Bereich der Photovoltaik-Gebäudeintegration. Die anderen Projekte verteilten sich auf die Bereiche Wechselrichtertechnologie, Schallschutz, frei aufgestellte Anlagen, Messungen zu Anlagen, Qualitätssicherung und PV-Planungshilfsmittel.



Figur 7: Dachintegration mit AluTec/AluVer in Holland, (Bildquelle: ENECOLO AG)

Weiterhin konnten sich diverse Schweizer Produkte mit Wurzeln in verschiedenen P+D-Projekten auch im europäischen Raum vor allem in den Bereichen Wechselrichter sowie Modulintegrations- und Modulbefestigungssysteme ihren Marktanteil sichern. Der sich bereits zu Beginn des letzten Jahres abzeichnende Erfolg der beiden Montagesysteme **SOLRIF** und **AluTec / AluVer** hat sich bei beiden Systemen klar bestätigt. Bis Ende 2001 wurden europaweit SOLRIF Profile [23], (Fig. 6) für PV-Module mit einer Leistung von rund 2 MWp ausgeliefert. Das AluTec / Aluver System (Fig. 7) [24] kam sogar auf über 3 MWp. Anhand der beobachteten Marktentwicklung dieser beiden Systeme ist auch für das laufende Jahr mit gleichbleibenden oder steigenden Umsätzen zu rechnen. Damit reihen sich diese beiden Systeme bei den erfolgreichsten P+D-Entwicklungen der letzten Jahre ein.

NEUE P+D-PROJEKTE

Im Jahr 2001 wurden 11 neue P+D-Projekte begonnen. Ein grosser Teil davon sind verschiedene Photovoltaik Gebäudeintegrationen, vor allem im Dachbereich. Besonderes Interesse könnte die Realisierung des **Mehrfamilien Passivhauses Sunny Woods** [25] in Zürich, mit einer vollflächig dachintegrierten 16-kWp-PV-Anlage mit amorphen Zellen hervorrufen. Die detaillierten Messungen zu diesem Projekt beginnen im März 2002, erste genauere Betriebsergebnisse sind auf Ende 2002 zu erwarten. Gespannt darf man sein auf die Reaktionen zur **Photovoltaik-Dachintegration in der geschützten Dorfkernzone in Wettingen** [26] und die weitere Entwicklung von Gründachintegrierten Photovoltaikanlagen, beispielsweise bei der Anlage **Solgreen Kraftwerk 1 in Zürich** [23].

LAUFENDE P+D-PROJEKTE



Figur 8: Mietsolarboot Zholar auf dem Zürichsee, (Bildquelle: NET AG)

Im Juli 2001 wurde der **Solar-Katamaran Mobilicat** [27] (Titelbild), ein Passagierschiff mit Platz für 150 Personen, offiziell eingeweiht und in Betrieb genommen. Die ersten Betriebserfahrungen belegen den angestrebten sparsamen Energieverbrauch, was auch bei schlechtem Wetter oder in der Nacht einen autonomen Betrieb von mehreren Stunden zulässt. Die Passagiere waren allgemein vom neuen Schifffahrtserlebnis des fast geräuschlosen Dahingleitens beeindruckt. Wer Solarenergie noch näher *erfahren* will, hat die Möglichkeit, auf dem Zürichsee das **6-plätziges Mietsolarboot Zholar** [28] (Fig. 8) selbst zu steuern.

Bei den netzgekoppelten Anlagen belegen die Messwerte der Anlage **PV Eurodach amorph** [29] (Fig. 9) die erwartete geringe Temperatur-

abhängigkeit der Spannung und damit des Energieertrags.



Figur 9: Thermisch isoliertes Photovoltaik Metallfalzdach (Bildquelle: NET AG) mit amorphen Zellen

Bei der **10-kWp-Solgreen-Anlage in Chur** [30], entwickelte sich der Pflanzenwuchs wie gewünscht. Gründach und PV-Anlage harmonieren bestens, Beschattungen durch zu hohe Pflanzen traten nicht auf. Die bei der Montage des Systems gesammelten Erfahrungen flossen direkt in die Weiterentwicklung des Solgreen-Systems ein.

Die **80-kWp-Schallschutzanlage entlang der A1 in Safenwil** [31] ging Ende 2000 ans Netz und wurde im Frühling 2001 offiziell eingeweiht. Ein grosser Teil der produzierten Energie konnte erfolgreich als Solarstrom platziert und verkauft werden, was den erheblichen Anstrengungen der *IG SOLAR* Safenwil zu verdanken ist.

Das erste Betriebsjahr des **LonWorks-Überwachungssystems**, das bei der 260-kWp-Anlage Felsenau [32] mit 68 Wechselrichtern installiert ist, belegt die gute Stabilität und Funktionalität dieses Systems. Eine abschliessende Auswertung der Betriebsdaten und Beurteilung dieses Projekts erfolgt nach Abschluss der Messphase gegen Mitte 2002.

IM JAHR 2001 ABGESCHLOSSENE P+D-PROJEKTE

Bei den abgeschlossenen Projekten fiel die **dachintegrierte 6,4-kWp-Anlage** [33] mit amorphen Zellen des IMT Neuenburg durch die regelmässig hohen Erträge um 1000 kWh/kWp pro Jahr und den unterbrochslosen Betrieb während der letzten 5 Jahre auf. Aufsehen im Bereich der Architektur, erregten insbesondere die **Anlagen**

der Kantonsschule Stadelhofen [34] (Fig. 10) und die PV-Dächer der Altstadt Unterseen [35] (Fig. 11).



Figur 10: Photovoltaik Beschattungsanlage Kantonsschule Stadelhofen, Zürich (Bildquelle: NET AG)

In den Bereichen Studien und Hilfsmittel steht nun die praktische Umsetzung als eines der Hauptziele an.



Figur 11: Photovoltaik Dächer Altstadt Unterseen (Bildquelle: NET AG)

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Das Jahr 2001 – das Jahr nach den Abstimmungen vom 24. September 2000 – erfordert eine differenzierte Betrachtung. Der Schweizer Photovoltaik-Markt dürfte ungefähr bei den Werten des Vorjahres stagnieren und wird in erster Linie durch die Solarstrombörsen getrieben. Solarstrombörsen stützen zwar die anhaltende Marktentwicklung aber sie tragen nicht im selben Mass zur Produktinnovation bei, da der Kostendruck häufig – aber nicht immer – zu den einfachsten Lösungen zwingt. Durch die zu den Kantonen verlagerte Verantwortung für die Photovoltaik-Förderung ergibt sich ein regional sehr unterschiedliches Bild. Vor diesem Hintergrund ergeben sich aufgrund firmeninterner Beurteilungen erwartungsgemäss Verschiebungen bei den Akteuren: während einzelne die Entwicklung kritisch beurteilen und es auch zu einem Betriebskonkurs gekommen ist, suchen andere eine mehr nach vorwärts und vor allem mehr international ausgerichtete Strategie. Dabei sind einzelne Unternehmen bzw. Produkte sehr erfolgreich. **Die Situation kann generell unter dem Stichwort Konsolidierung subsummiert werden.**

Die finanziellen Mittel für Forschung, Entwicklung und Umsetzung konnten insgesamt in der-

selben Grössenordnung wie bisher gehalten werden. **Angesichts einer weiterhin angespannten Finanzlage ist eine breite Programmabstützung jedoch unabdingbar.** Diese konnte im Jahr 2001 ausgebaut werden. Aus technologischer Sicht, aus der Perspektive der Umsetzung und der internationalen Zusammenarbeit kann – wie die aufgeführten Beispiele belegen – das Jahr 2001 als Erfolg gewertet werden. Eine grosse Präsenz der Schweizer Photovoltaik war an der 17. Europäischen Photovoltaikkonferenz in München zu verzeichnen [49].

Aufgrund der laufenden und zur Zeit neu initiierten Projekte fällt der **Ausblick für 2002 grundsätzlich positiv** aus. Die angespannte Finanzlage zwingt jedoch zu einer konsequenten Marktorientierung und einer Fokussierung. Gemeinsame Ziele und Visionen der verschiedenen Akteure können die Schweizer Photovoltaik weiter stärken. Im P+D-Bereich sollten neue grössere Projekte initiiert werden, welche eine starke Demonstrationswirkung ausüben. Der Informationsaustausch wird in spezialisierten Workshops und besonders anlässlich der nationalen Photovoltaiktagung in Lugano gepflegt. Die Schweizer Photovoltaik website www.photovoltai.ch wird im Jahr 2002 voll betriebsbereit sein.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden

- [1] A. Shah, (arvind.shah@unine.ch), IMT, UNI-Neuchâtel: **a) IMT 2000 - 2002 Technologische Weiterentwicklung der mikromorphen Solarzellen** (JB) ♦ **b) DOIT: Development of an optimized integrated thin film silicon solar module** (JB) ♦ **c) Advanced Solar Antennas (ASOLANT)** (JB), 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)
- [3] D. Fischer, (info@vhf-technologies.com), VHF-Technologies, Le Locle: **Procédé de fabrication industrielle de cellules solaires flexibles sur film plastique mince pour l'alimentation d'appareils électroniques** (JB), <http://vhf-technologies.com>
- [4] B. Bitnar, (Bernd.Bitnar@psi.ch), PSI-Villigen: **a) Entwicklung thermophotovoltaischer Zellen und Systeme für die Erzeugung von Wärme und Strom** (JB) ♦ W. Durisch: **b) Charakterisierung von PV Generatoren**, www.psi.ch/LMN
- [5] A.N. Tiwari, (tiwari@phys.ethz.ch), IQE, ETH-Zürich: **a) CADBACK (The CdTe thin film solar cell - improved back contact)** (JB) ♦ **b) FLEXIS (CIS thin film solar cells on flexible substrates)** (JB) ♦ **c) PROCIS: Production of large are CIS modules** (JB) ♦ **d) NANOCIS: Nanomaterials for high efficiency and low cost Cu (In,Ga) Se2 thin film solar cells - TOP NANO 21** (JB), www.tfp.ethz.ch/
- [6] M. Grätzel (michael.graetzel@epfl.ch), ICP2 / EPF-Lausanne: **a) Dye sensitised nanocrystalline solar cellss** (JB) ♦ **b) Nanocrystalline Flexible Photovoltaic Cells based on Sensitized Heterojunctions - TOP NANO 21** (JB) ♦ **c) Highly efficient nanocrystalline solar cells for indoor applications - TOP NANO 21** (JB) ♦ **d) Freiluft - Messungen von Solarzellen neuer Technologie** (JB), <http://dcwww.epfl.ch/icp/ICP-2/icp-2.html>
- [7] T. Meyer, (toby@solaronix.com), SOLARONIX, Aubonne: **LOTS-DSC (Longterm stability of dye-sensitized solar cells for large area power applications)** (JB), www.solaronix.ch
- [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] Ch. Roecker, (christian.roecker@epfl.ch), LESO/EPF-Lausanne: **a) PV en face! Low-cost, high-quality concepts for façade integrated PV systems** (JB) ♦ **b) Demosite 2000 – 2002: Demosite and Demosite Flat Roofs (phase IV)** (JB), www.demosite.ch, <http://lesomail.epfl.ch>
- [10] P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), ENECOLO, Mönchaltorf: **a) EnerBuild RTD: Energy in the built environment** www.enerbuild.net (JB) ♦ **b) Workshop Energierrelevante Kriterien für Solarmodule** ♦ **c) PVSAT: Remote performance check for grid connected PV systems using satellite data** (JB) ♦ **d) Enecolo 2000 - 2001 Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 7 - Phase II** (JB), <http://www.solarstrom.ch>
- [11] P. Hofer, (ho@3-s.ch), 3S, Bern: **HIPERB (High performance photovoltaics in buildings)** (JB)
- [12] D. Chianese, (domenico.chianese@dct.supsi.ch), LEEE, SUPSI - DCT, Canobbio: **a) TISO 2000 - 2002 Qualità e resa energetica di moduli ed impianti fotovoltaici** (JB) ♦ **b) SOLAREC Mean time before failure of photovoltaic modules (MTBF-PVm)** (JB), <http://lee.e.dct.supsi.ch>

- [13] H. Häberlin, (heinrich.haeberlin@hta-bu.bfh.ch), HTA-Burgdorf: **a) Langzeitverhalten von netzgekoppelten PV-Anlagen 2** (JB) ♦ **b) PV-EMI (Development of standard test procedures for electromagnetic interference (EMI) tests and evaluations on PV components and plants)** (JB), www.hta-bu.bfh.ch/e/pv/pv-indd.htm
- [14] M. Viloz, (mviloz@dynatex.ch), DYNATEX, Colombier: **a) INVESTIRE: Investigation on storage technologies for intermittent renewable energies: evaluation and recommended R&D strategy** (JB) ♦ **b) Participation Suisse à la Tâche III AIE - PVPS IEA Task 3** (JB)
- [15] S. Kunz, (remund@meteotest.ch), Meteotest, Bern: **SoDa: Integration and Exploitation of networked Solar Radiation Databases** <http://soda.jrc.it> (JB), www.meteotest.ch
- [16] P. Ineichen, (pierre.ineichen@cuepe.unige.ch), CUEPE, Genève: **HELIOSAT-3: Energy-Specific Solar Radiation Data from Meteosat Second** (JB), www.unige.ch/cuepe/intro.htm
- [17] H.-J. Mosler, (mosler@sozpsy.unizh.ch), Universität Zürich: **MSG: Combined project on multi-user solar hybrid grids** (JB), www.sozpsy.unizh.ch/sozpsy-gutscher.html
- [18] P. Hüsser, (pius.huesser@novaenergie.ch), NOVA ENERGIE, Aarau: **Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Programm, Task 1** (JB), www.novaenergie.ch/
- [19] Th. Nordmann, (nordmann@tnc.ch), TNC CONSULTING, Männedorf: **Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Programm, Task 2** (JB), www.tnc.ch
- [20] S. Taiana, (sergio.taiana@ewz.stzh.ch), EWZ, Zürich: **EWZ 2000 - 2002 Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 5** (JB), www.ewz.ch/
- [21] S. Nowak, (stefan.nowak.net@bluewin.ch), NET, St. Ursen: **a) Schweizer Beitrag IEA - PVPS Task 9 – seco** (JB) ♦ **b) Pilotmässige Unterstützung von GEF-Anträgen im Bereich Solarenergie – BUWAL** ♦ **c) PV-EC-NET**, www.photovoltaiic.ch
- [22] M. Real, (alphareal@access.ch), ALPHA REAL, Zürich: **a) Normenarbeit für PV Systeme** (JB) ♦ **b) Global Approval Programm PV GAP** (JB)

Liste der P+D-Projekte (Auswahl)

- [23] P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), ENECOLO, Mönchaltorf: **a) SOLRIF (Solar Roof Integration Frame)** (SB), ENET: 200160 ♦ **b) Solgreen Kraftwerk 1** (JB), www.solarstrom.ch
- [24] U. Bühler, (u.bue_cham@bluewin.ch), Urs Bühler Energy Systems and Engineering, Cham: **Sloped roof- and façade –mounting-system AluTec / AluVer** (JB, SB)
- [25] R. Naef, (naef@igjzh.com), Naef Energietechnik, Zürich: **Sunny Woods** (JB)
- [26] H.-D. Koepfel, (hans-dietmar.koepfel@skk.ch), Eigentümergemeinschaft P.P. Stöckli / H.-D. Koepfel, Wettingen: **PV Dachintegration Dorfkernzone Wettingen**
- [27] R. Minder, (rudolf.minder@bluewin.ch), Minder Energy Consulting, Oberlunkhofen: **SolarCat - Solar-Electric powered Passenger Ship** (JB), www.minder-energy.ch
- [28] R. Schmid, (roli.schmid@gmx.ch), SSES Regionalgruppe Zürich: **Zholar, Mietsolarboot auf dem Zürichsee**, (JB, SB)
- [29] H. Kessler, (hke.pamag@flumroc.ch), PAMAG AG, Flums: **3-kWp-PV Eurodach amorph** (JB), www.flumroc.ch
- [30] R. Hächler, (ars_solaris@freesurf.ch), Ars Solaris Hächler, Chur: **Pilot installation 10-kWp-Flat Roof System: SOLGREEN** (JB)
- [31] R. Hottiger, (info@ekotech.ch), IG Solar, Safenwil: **PV / Noise Barrier Installation: Alpha A1 in Safenwil** (JB), www.ekotech.ch

- [32] Ch. von Bergen, (christoph@solarmax.com), Sputnik Engineering AG, *Nidau: LonWorks as Fieldbus for PV-Installations* (JB, Zwischenbericht), www.solarmax.com
- [33] R. Tscharner, (Reto.Tscharner@imt.unine.ch), IMT, *Neuchâtel: Roof integrated amorphous silicon photovoltaic plant IMT Neuchâtel* (JB, SB), www-micromorph.unine.ch
- [34] Th. Nordmann, (nordmann@tnc.ch), TNC Consulting, *Erlenbach: 27-kWp-PV-Installation High School Zurich-Stadelhofen* (JB), www.tnc.ch
- [35] F. Bigler, (fritz.bigler@ibi-interlaken.ch), Industrielle Betriebe, *Interlaken: PV roofs in the old town of Unterseen* (JB, SB), www.ibi-interlaken.ch, ENET: 210035

Referenzen

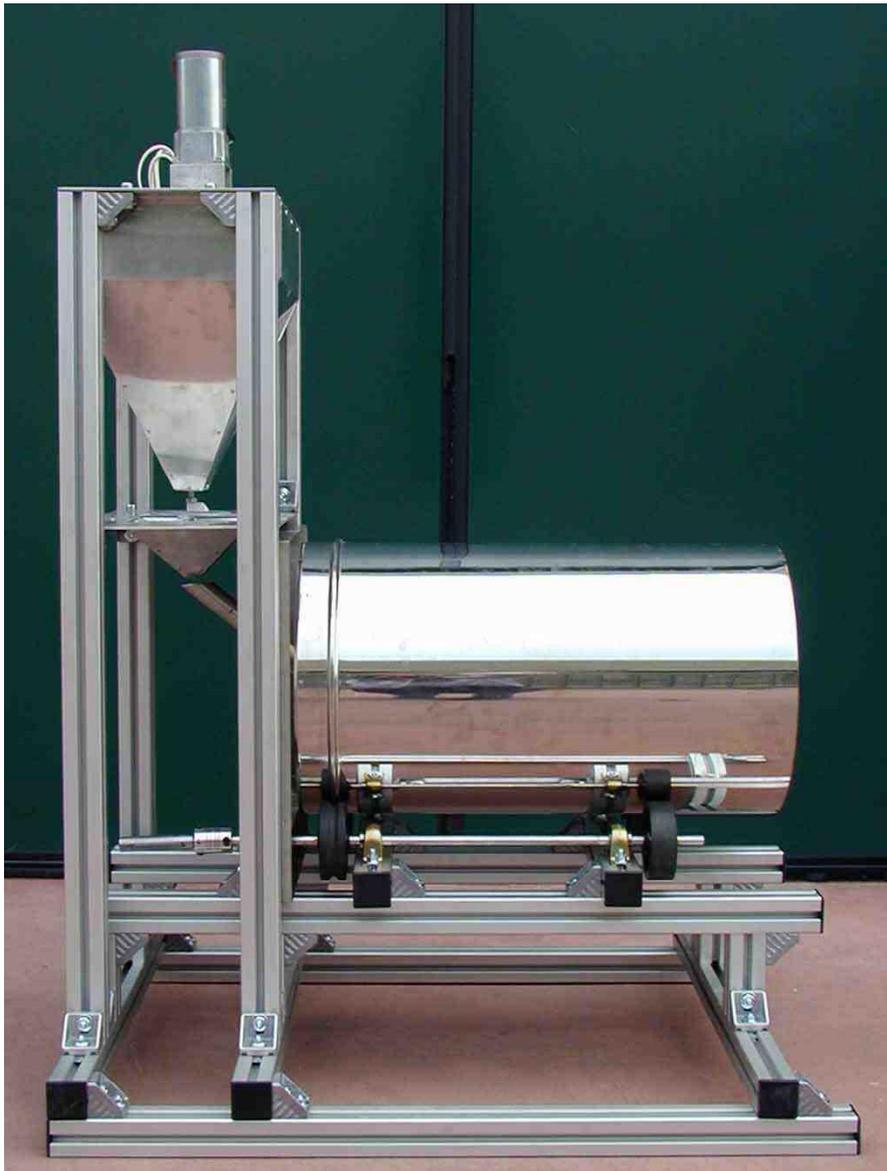
- [36] *Forschungskonzept Photovoltaik 2000 – 2003*, Bundesamt für Energie, 2001, www.photovoltaic.ch
- [37] *LEEE-News, Newsletter of the Laboratory of Energy, Ecology and Economy*, zu beziehen bei TISO, Fax 091 935 13 49, Email: leee@dct.supsi.ch
- [38] *Meteonorm 4.1, Global Meteorological Database for Solar Energy and Applied Meteorology*, www.meteotest.ch
- [39] *Satellight, The European Database of Daylight and Solar Radiation*, <http://satellight.entpe.fr>
- [40] P. Hüsler, (pius.huesser@novaenergie.ch), Nova Energie, *Aarau, Swiss national report on PV power applications 2000*, 2001
- [41] *Trends in Photovoltaic Applications in selected IEA countries between 1992 and 2000*, IEA PVPS Task 1 – 10: 200, www.iea-pvps.org
- [42] *IEA PVPS Newsletter*, zu beziehen bei Nova Energie, Schachenallee 29, 5000 Aarau, Fax 062 834 03 23
- [43] *Added values of Photovoltaic Power Systems*, IEA PVPS Task 1 – 09: 200, www.iea-pvps.org
- [44] *Performance Database*, IEA PVPS Task 2, Version 1.19, July 2001, www.task2.org
- [45] *Workshop Operational Performance, Reliability and Sizing of Photovoltaic Power Systems*, IEA PVPS Task 2, 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich, October 2001
- [46] *Workshop Impacts of PV Penetration in Distribution Networks – Network Aspects on High Penetration Level of PV Systems and Islanding Analysis*, IEA PVPS Task 5, January 2002
- [47] *PV in Non Building Structures – a design guide*, IEA PVPS Task 7 - 02: 2000, www.iea-pvps.org
- [48] *Building with Solar Power*, IEA PVPS Task 7, to be published by Images Australia
- [49] *17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition in München – aus Schweizer Sicht*, BFE, 2002, www.photovoltaic.ch

SOLARCHEMIE / WASSERSTOFF

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2001

Armin Reller

armin.reller@physik.uni-augsburg.de



Reaktor und Fördersystem für das solare Brennen von Kalk

Bei der solaren Herstellung von Kalk wird über ein Fördersystem (links) kontinuierlich Rohkalk in den Reaktorraum gespiesen, wo mittels konzentrierter Solarstrahlung der Brennprozess bei über 1'000 °C abläuft.

Programmschwerpunkte

Im Programm *Solarchemie / Wasserstoff* werden Forschungs-, Entwicklungs- und Umsetzungsprojekte durchgeführt, deren Ziel es ist, solare Strahlungsenergie unterschiedlicher Konzentration für optische, thermische, mechanische und chemische Anwendungen möglichst effizient zu sammeln und umzuwandeln. Materialien, Prozesse und technische Systeme, die im Zentrum des Interesses stehen, werden untersucht und optimiert.

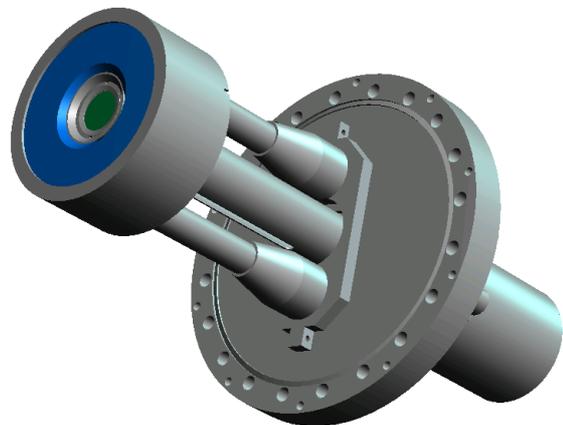
Als Energieträger mit grossem Zukunftspotential wird **Wasserstoff** mittels photoelektro-chemischer oder mittels solar-thermischer Prozesse hergestellt. Neben der Herstellung wird vor allem auch die sichere Speicherung von Wasserstoff in chemischen und physikalischen Systemen untersucht. Synergien aus den Aktivitäten rund um Wasserstoff sollen durch das im Berichtsjahr gegründete schweizerische Wasserstoff-Kompetenzzentrum *HYDROPOLE*[®] genutzt werden. Diese Institution soll als Koordinationsstelle und Informationsplattform für Wasserstoff-technologie bzw. die Wasserstoffwirtschaft fungieren.

Ein weiterer wichtiger Schwerpunkt ist das **solare Brennen von Kalk**. Dieser Prozess weist ein erhebliches Potential für die Reduktion von Kohlendioxidemissionen auf. Die Abläufe der solarthermischen Immobilisierung von toxischen Reststoffen, insbesondere von Schwermetallen in einer Keramikmatrix, werden bei einem Hochtemperaturprozess im Sonnenofen untersucht. Er kann für die ständig bedeutender werdende Kreislaufwirtschaft von Materialien einen entscheidenden Beitrag leisten. Die beiden letztgenannten Arbeitsgebiete zeigen eine Entwicklungsdynamik, die eine rasche Umsetzung in die technisch-industrielle Nutzung verspricht. Auch die experimentellen Befunde betreffend der katalytischen Umwandlung von Kohlendioxid in wertschöpfende Grundstoffe sowie der Synthesen in überkritischem Kohlendioxid – Kohlendioxid wird hier als Grundstoff und nicht als Abfall behandelt – sind vielversprechend und lassen eine baldige Umsetzung in technische Prozesse erwarten.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

PASSIVE SONNENENERGIENUTZUNG / ABSORBERMATERIALIEN

Die Entwicklung von **Materialien für nachhaltige Technologien in der Energieumwandlung und Energieeinsparung** [1] konnte in den vergangenen Jahren für unterschiedliche Einsatzbereiche angewendet werden. Im Berichtsjahr wurden Abscheidungsmethoden geprüft, die den Aufbau von Materialien mit ausgewählten optischen Eigenschaften wie Titanitrid, Molybdändisulfid oder Eisencluster enthaltenden Kompositschichten erlauben. Die Herstellung derartiger Funktionsschichten erfordert die Verfügbarkeit von anspruchsvollen Herstellungsmethoden. In diesem Projekt wird als technische Einheit ein so genanntes Magnetron (Fig. 1) eingesetzt, mit dem es gelingt, gleichzeitig aus zwei Komponenten zusammengesetzte Materialien bzw. Dünnschichten auf einem Substrat abzuscheiden. Die damit erzeugten Funktionsschichten können nicht nur für thermische, sondern z.B. als Warmwasserkollektoren in der Haustechnik auch mit farbgebender Funktion genutzt werden.



Figur 1: Magnetron mit 2 Targets: die konzentrische Anordnung der Targets stellt eine ideale Konfiguration für die homogene Deposition von zwei Materialien dar.

Zur Optimierung des Energiehaushalts von Gebäuden wurden Modellierungen der optischen Eigenschaften von Fenstern mittels zwei- und dreidimensionalen Berechnungen mit der Methode der finiten Elemente durchgeführt. Es konnten nicht nur klare Verbesserungen erzielt,

sondern auch detaillierte Temperaturverteilungen in Bauelementen berechnet werden. Die Resultate können für die Planung energieoptimierter Gebäude erhebliche Erleichterungen bzw. ein grosses Einsparpotential erbringen.

SOLARCHEMIE BEI RAUMTEMPERATUR

Photoelektrochemische Prozesse nutzen vor allem den kurzwelligen Anteil der (unkonzentrierten) Sonnenstrahlung für Prozesse wie die Spaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff, oder für die Detoxifizierung von Brauchwasser. Beide Prozesse weisen ein erhebliches Zukunftspotential auf. In den Projekten *La photolyse de l'eau et la production d'hydrogène et d'oxygène au moyen de l'énergie solaire* [2], *Generation of Hydrogen by Water Splitting with Visible Light* [3] und *Photochemische und photoelektrochemische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie* [4] wurden durch die langjährige Optimierung von Photoelektroden bezüglich Effizienz, Selektivität und chemischer Inertheit wichtige Fortschritte erzielt. Hauptsächlich bei den für die Wasserspaltung notwendigen Funktionsmaterialien wurden Verbesserungen erzielt: neben den bis anhin eingesetzten Wolframoxid- und Titanoxid-Elektrodenmaterialien wurden vor allem an dotierten Eisenoxiden wichtige Erkenntnisse gewonnen. Auch die Palette der Verbindungen, die als Photosensibilisatoren auf den Titanoxidelektroden aufgebracht werden, konnte erweitert werden. Die seit mehreren Jahren in Entwicklung begriffenen Silber/Silberchlorid-Photoanoden zur Oxidation von Sauerstoff sowie ein ausgeklügeltes, antennenartig arbeitendes System, das in einer Tandemsolarzelle zum Einsatz kommen soll, konnten optimiert werden. Insgesamt führte die Kooperation zwischen den Universitäten Genf und Bern und der EPF-Lausanne zum Aufbau einer auch international anerkannten Fachkompetenz. Die zusammengetragenen grundlagenwissenschaftlichen Erkenntnisse sowie die teilweise schon praxisnahen Anwendungen bilden die Eckpfeiler für eine zukünftige photoelektrochemische Wasserspaltung bzw. für die Wasserstoff- oder die Stromerzeugung.

SOLARCHEMIE BEI HOHEN TEMPERATUREN

Vorrangige Ziele der Solarchemie bei hohen Temperaturen ist die Einkopplung von konzentrierter Strahlungsenergie in industrielle Prozesse.

Dies ist gleichbedeutend mit der Reduktion sowohl des Einsatzes fossiler Energieträger als auch der Emission von Kohlendioxid. Zielprodukte dieser Verfahren sind gebrannter Kalk als wichtiger Baustoff, Wasserstoff als sekundärer Energieträger, Synthesegas zur Herstellung organischer Grundchemikalien, oder Metalle wie Zink als Batteriematerialien oder sekundäre Rohstoffe. Auch die Decarbonisierung fossiler Kohlenstoffverbindungen sowie die Immobilisierung toxischer Stoffe mittels Hochtemperatur-Solarchemie sind attraktive Verfahren für eine nachhaltige Stoffkreislauf-Wirtschaft. Nachdem in den vergangenen Jahren mit dem Bau des neuen Sonnenofens am PSI und der Optimierung der Steuerungs- und Messmimiken gute Rahmenbedingungen für erfolgreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten geschaffen wurden, konzentrierten sich die Arbeiten im Berichtsjahr auf die eigentlichen Prozesse bzw. deren Optimierung. Dazu wurden insbesondere Reaktoren entworfen und optimiert sowie experimentelle und theoretische Studien für effiziente verfahrenstechnische Umsetzungen erarbeitet.

Solare Herstellung von Kalk

Zusammen mit der Firma *QUALICAL*, in Bergamo, Italien, wird am PSI die *solare Herstellung von Kalk* [5] mit Erfolg in Richtung Industrieprozess vorangetrieben. Ein 10-kW-Solarreaktor (s. Titelbild) zur Herstellung von Kalk (CaO) wurde konstruiert, gebaut und im Solarofen des PSI getestet. Dieser neuartige Reaktor besteht aus einem horizontalen Drehrohr mit einem innovativen Partikel-Fördersystem für kontinuierlichen Betrieb (mittlere Produktionsraten von 10•30 g gebranntem Kalk (CaO) pro Minute). Der Reaktionsraum ist mit einem feuerfesten Mörtel ausgekleidet und mit einer porösen Keramik isoliert, welche Temperaturen bis 1'600 °C erlaubt. Um die technische Machbarkeit des 10-kW-Solarreaktor-Prototyps zu demonstrieren, wurden am PSI ausgedehnte Experimente durchgeführt. Die Resultate bestätigen, dass im Solarreaktor Kalk mit einem Kalzinierungsgrad von über 98% und mit jeder gewünschten Qualität im Bereich zwischen tiefer und hoher Reaktivität hergestellt werden kann. Die kritischsten Parameter waren die Betriebstemperatur und die Verweilzeit der Partikel im Reaktor. Der thermische Wirkungsgrad, der als Verhältnis der Prozesswärme für die chemische Reaktion zur eingebrachten solaren Leistung definiert ist, beträgt 10-15% für diesen noch nicht optimierten Prototyp. Dieses Ergebnis lässt darauf schliessen, dass das Potential für die

Entwicklung eines effizienteren und kostengünstigen Prozesses für die industrielle solare Kalzinierung noch gross ist.

Hochtemperatur-Solarchemie mit dem Zink / Zinkoxid - System

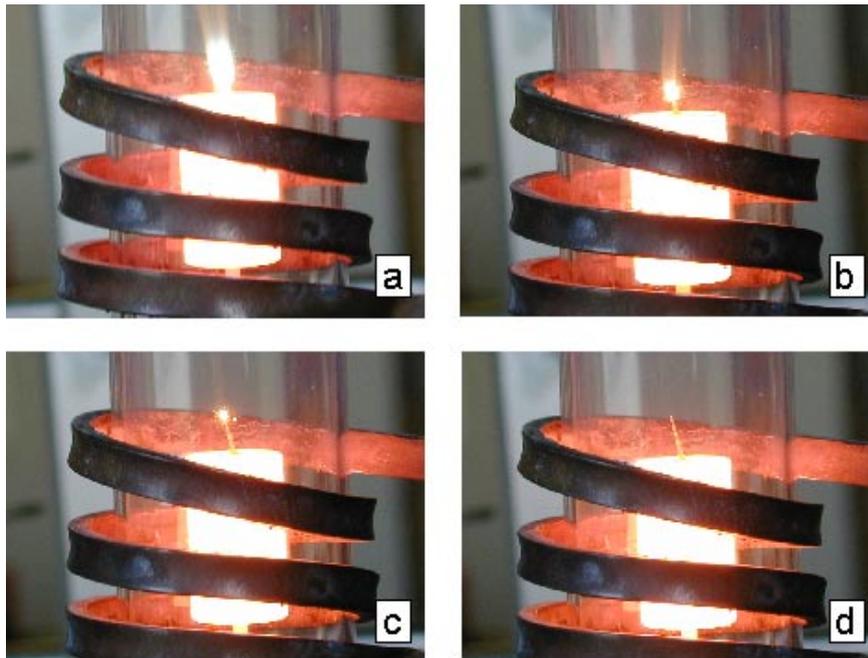
Die solarthermische Reduktion von Metalloxiden bei hohen Temperaturen bildet weiterhin den Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten an den Solaranlagen des PSI. Ziel der Arbeiten ist die effiziente Umwandlung hoch konzentrierter Solarstrahlung in chemische Energieträger oder sekundäre Rohstoffe mit hoher Wertschöpfung. Die vielversprechendsten Prozesse wurden in den vergangenen Jahren evaluiert und als Schwerpunktsthemen definiert:

- Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mit dem Zinkoxid/Zink-Zyklus
- Umwandlung von Zinkoxid mit Methan in Zink und Synthesegas
- Herstellung von Zink durch die carbothermi-

sche Reduktion von Zinkoxid oder durch die thermochemische Reduktion von Zinksulfid

Zink und seine Verbindungen haben sich als bisher optimales und vielversprechendstes solarchemisches System erwiesen, da pro Zinkatom vergleichsweise hohe Energien (zwei Elektronen pro Zinkatom) umgesetzt werden, die Rohstoffe in genügender Menge zur Verfügung stehen, und da die eingesetzten sowie entstehenden Stoffe nicht toxisch sind. Die Arbeiten teilen sich in experimentelle bzw. verfahrenstechnische, theoretische bzw. modellierende, sowie analytische Untersuchungen auf.

Im Projekt **Solar thermal production of zinc** [6] wurde die Reduktion von Zinkoxid bei 1'950 – 2'400 K im weiter optimierten ROCA-Reaktor bezüglich Verfahrenstechnik und Wirkungsgrad erfolgreich getestet. Modellrechnungen bestätigten die experimentellen Resultate, wobei sich nun wichtige Aussagen über Kinetik und Energetik des Gesamtprozesses machen lassen.



Figur 2: Brennender Zinkdampf. 52 s (a), 60 s (b), 65 s (c) nach Sauerstoffzugabe und nach Verlöschen der Flamme (d).

Zur Spezifikation der elementaren Schritte im Zinkoxid-Zink-Zyklus wurden in den Projekten: **Auf dem Weg zu solaren Brennstoffen – Physikalisch-chemische Beiträge zur Entwicklung von Solarreaktoren** [7] und **Darstellung und Spektroskopie von ZnO bzw. Zn_xO_y in der Gasphase** [8] sowohl grundlagenwissenschaftliche als auch messtechnische Me-

thoden und Modellierungen durchgeführt. Mit laserspektroskopischen Methoden konnte gezeigt werden, in welcher Form Zink bzw. Zinkoxid in der Gas- bzw. Dampfphase vorliegt (Fig. 2). Diese Information ist entscheidend, um die Kondensation des erwünschten Produkts Zinkmetall optimal kontrollieren zu können. Insgesamt konnten für den Zink/Zinkoxid-Zyklus ent-

scheidende Kenndaten zusammengetragen werden, die für eine zukünftige technische Realisierung notwendig sind. Vergleichende Studien an analogen Prozessen wie zum Beispiel dem Eisen/Eisenoxid-Zyklus, ergaben wichtige Ergänzungen zum detaillierten Verständnis für eine Optimierung verfahrenstechnischer Parameter, d.h. für die Auslegung effizient arbeitender, für den jeweiligen Prozess massgeschneiderter Solarreaktoren. Auch die Modellrechnungen auf der Basis vorhandener (experimenteller) Befunde führten zu aussagekräftigen Prognosen des Energiemanagements und der Wirtschaftlichkeit. So lässt sich für die Erzeugung von solarem Wasserstoff unter optimalen technischen Voraussetzungen ein Preis von unter 0,30 CHF pro kWh, die in Wasserstoff gespeichert ist, errechnen. Dieser Preis ist tiefer als heute handelsüblich. Insgesamt ist das Schwerpunkts-Projekt Hochtemperaturchemie mit Metall/Metalloxid-Zyklen erfolgreich und international führend.

Hochtemperatur-Solarchemie für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft

Während die oben genannten Bestrebungen zur Erzeugung sekundärer Energieträger wie Wasserstoff und Synthesegas oder wertschöpfender Produkte wie Zink gelten, sind die in der Folge beschriebenen Projekte der Verwertung von Reststoffen bzw. der Entsorgung von Gefahrstoffen gewidmet. Im Projekt ***Solar decarbonization of fossil fuels – clean energy technologies for CO₂ mitigation*** [9] wird die solarthermische Umwandlung kohlenstoffreicher fossiler Energieträger in wasserstoffreiche Verbindungen verfolgt. Dies ist ein technisch interessanter und vielversprechender Weg zu einer Senkung von CO₂-Emissionen. So wurden die Umwandlungen von Kohlenarten wie Teer, Bitumen oder Anthrazit in Synthesegas und/oder Wasserstoff (und reinen Kohlenstoff) modelliert. Die Berechnungen zeigten, dass bei einer Reaktionstemperatur von 1'350 K (entspricht der 2'000-fachen Konzentration von Solarstrahlung) die Verfahrenstechnik so optimiert werden kann, dass Strom mit einem Kohlendioxidausstoss von 0,5 kg/kWh_e erzeugt werden kann. Dies entspricht in etwa der Hälfte der Emissionen, die in modernen Kohlekraftwerken gemessen werden. Aufgrund dieser theoretischen Betrachtungen soll nun ein Reaktor für einen solaren Energieinput von 5 kW konzipiert werden.

Im Projekt ***Redox-Kreisprozess zur Produktion von reinem Wasserstoff aus dem Rohgas***

eines Holzvergasers (Redox-Filter) [10] wurden die Bedingungen untersucht, die eine wirtschaftlich attraktive Erzeugung von Wasserstoff oder Strom aus Holz bzw. Biomasse erlauben. Über einen Eisenoxid-Kreislaufprozess sollen Wasserstoff und daraus Strom gewonnen werden. Die Modellierung zeigt, dass der Wirkungsgrad für die Erzeugung von Wasserstoff stark von der Gasqualität und den thermochemischen Eigenschaften des Eisenoxids abhängt. Eine Laboranlage wurde aufgebaut, um das Modell zu validieren. Die Messdaten stimmen gut mit den erwarteten Werten überein, wobei jedoch durch thermodynamisch bedingte Begrenzungen keine hohen Wirkungsgrade erreicht werden können. Im Vergleich zur konventionellen Wasserstoffproduktionstechnik ist der REDOX-Prozess nicht konkurrenzfähig. Er kann aber nutzbringend in konventionelle Vergasungsprozesse integriert werden.

Schliesslich wurde die Umwandlung von Sondermüll in gut zu handhabenden Restmüll bzw. in sekundäre Rohstoffe im planmässig laufenden Projekt ***Solarthermische Prozesse in der Kreislaufwirtschaft*** [11] erfolgreich fortgeführt. Es konnte nachgewiesen werden, dass der patentierte solarthermische Reaktor für kontinuierliche Beschickung, aber auch für ein Upscaling gut geeignet ist. Es wurden thermische Wirkungsgrade von bis zu 17% erreicht, was für einen grosstechnischen Reaktor Wirkungsgrade von über 50% erwarten lässt. Die beim solarthermischen Prozess entstehenden Restmüllfraktionen und Rauchgase können mit konventionellen Techniken behandelt werden.

SPEICHERUNG UND NUTZUNG VON WASSERSTOFF

Wasserstoff ist das wichtigste Produkt aus den beschriebenen solarchemischen und solarthermischen Prozessen. Dessen sichere und technisch realisierbare Speicherung sowie dessen spezifische Nutzung ist das primäre Ziel der folgenden Forschungsprojekte:

Die Speicherung und der Transport grosser Mengen von Wasserstoff in hoch verdichteter Form, aber möglichst bei Raumtemperatur, wird über chemische Speichermaterialien angestrebt. Im Projekt ***Destabilisation of metal hydride complexes and theoretical modelling*** [12] werden seit einigen Jahren Metallhydride hergestellt und bezüglich günstiger Adsorptions- und Desorptionseigenschaften für Wasserstoff cha-

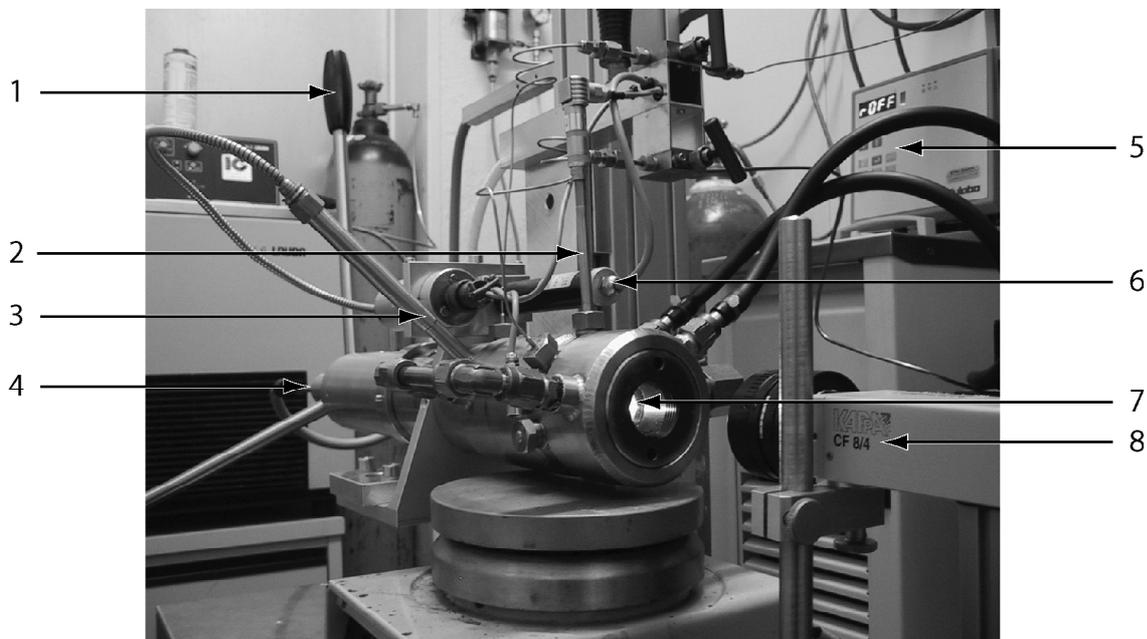
rakterisiert. Dabei wurden erstmals katalytisch wirkende Zusätze verwendet, welche für die Reversibilität z.B. des Magnesium/Eisen-Hydridsystems äusserst günstige Wirkung zeigten. Die Modellierung des Hydrierungs-/Dehydrierungsvorgangs konventioneller Speicher wie des Lanthan-Nickel-Systems in Abhängigkeit elementarer Kenngrössen ergaben aufschlussreiche Resultate, die für das Auffinden besser geeigneter Legierungen dienen.

Die seit einigen Jahren bekannten und intensiv erforschten Substitute für metallische Hydridspeicher sind die Kohlenstoffmodifikationen und -verbindungen. Ihr Potential wird im Projekt **Wasserstoff in Kohlenstoffstrukturen** [13] ausgelotet und mit den metallischen Systemen verglichen. Die wichtige Frage nach der Speicherkapazität der hoch eingeschätzten Kohlenstoffnanotubes konnte dahin gehend beantwortet werden, dass die Menge des speicherbaren Wasserstoffs in etwa mit der durch Adsorption an der Oberfläche zu erwartenden übereinstimmt. Dieses vorerst ernüchternde Resultat ist für die Ausrichtung der kommenden Forschungsaktivitäten bedeutungsvoll, da auch in der Fachliteratur immer noch phantastisch anmutende Speicherkapazitäten bekannt gegeben werden. Neuerdings konzentrieren sich die Aktivitäten wieder vermehrt auf Metall-Legierungen, insbesondere der leichten Elemente. Es gelang,

im Lithium-Bor-System Höchstmengen von 60 Massen-% Wasserstoff zu desorbieren. Offenbar ist das Auffinden von bestgeeigneten konventionellen Hydridspeichern noch lange nicht abgeschlossen.

MATERIALWISSENSCHAFTLICHE UND VERFAHRENSTECHNISCHE ENTWICKLUNGEN

Die Identifikation von neuartigen Produktions-, Speicher- und Nutzungstechnologien sowie der dafür geeigneten Materialien und Verfahren ist ein strategisch wichtiges Segment des Programms. Dabei werden – sozusagen als Antennenfunktion – Untersuchungen durchgeführt, in denen entweder konventionelle Techniken neu kombiniert oder noch nicht genutzte bzw. neu entdeckte Prinzipien realisiert werden. So werden mit Erfolg **Katalytische Synthesen ausgehend von Kohlendioxid** [14] studiert, wobei anthropogen erzeugtes Kohlendioxid (z.B. aus Verbrennungsprozessen) mittels geeigneter Katalysatoren unter ökonomisch und ökologisch attraktiven Bedingungen zu wichtigen organischen Produkten wie Formamiden, Carbamaten oder Carbonaten umgesetzt wird (s. Fig. 3). Zudem wurde das Potential von Kohlendioxid als Ersatz umweltbelastender Lösungsmittel eruiert. Dabei wurde bei überkritischen Bedingungen gearbeitet, ein Verfahren, dessen Möglichkeiten erst fragmentarisch bekannt sind.



Figur 3: Apparatur zur Untersuchung des Phasenverhaltens: 1 Handspindelpresse, 2 Temperaturfühler, 3 Druckaufnehmer, 4 Lichtleiter, 5 Thermo- / Kryostat, 6 Wegaufnehmer, 7 Saphirglas, 8 CCD-Kamera

Schliesslich wurde zusammen mit dem Programm Umgebungswärme, Kälte, Abwärme im Gemeinschaftsprojekt **AMMOTRAP** [15] ein Sicherheitssystem für den Einsatz von Ammoniak in Kleinwärmepumpen erarbeitet und patentiert. Die technische Realisierung konnte jedoch aufgrund fehlenden Interesses seitens der Unternehmer noch nicht weitergeführt werden.

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

Über die geleisteten Arbeiten des Programms *Solarchemie / Wasserstoff* wurde eine grosse Anzahl von Publikationen in der Fachliteratur veröffentlicht. Die Resultate der Projektarbeiten wurden auch an zahlreichen Konferenzen, an Hochschulen und Fachforen in Form von Vorträ-

gen und Postern präsentiert. Detaillierte Angaben betreffend Publikationen können den Jahresberichten der Projektleiter entnommen bzw. bei ENET (www.energieforschung.ch) heruntergeladen werden. Daneben sind zwei Übersichtsartikel von Projektnehmern besonders erwähnenswert. Sie wurden in der sehr angesehenen Zeitschrift *Nature* publiziert und für eine breite Leserschaft verfasst. Mit dem Titel **Photoelectrochemical Cells** [17, 3] lieferte M. Grätzel einen gut verständlichen Einblick in die photochemische Produktion von Wasserstoff. Der Artikel **Hydrogen-storage materials for mobile applications** [18, 13] von L. Schlapbach und A. Züttel vermittelt den *state-of-the-art* eines äusserst zukunftsreichen Themas.

Nationale Zusammenarbeit

Die **Vernetzung und Schwerpunktbildung** der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konnte verstärkt werden. Dies gilt insbesondere für den Teil Solarchemie, in dem sich um das PSI als Zentrum ein Netzwerk von Hochschulen und Industrien bildet und in dem auch mit anderen Programmen aktiv kooperiert wird. Auch die Zusammenarbeit der Universitäten Genf und Bern, sowie der EPF-Lausanne bei der Optimierung von Photoelektroden führte zu einem international beachteten Kompetenzaufbau.

Durch die Gründung des schweizerischen **Wasserstoff-Kompetenzzentrums HYDROPOLE®** im Herbst des Berichtsjahrs steht nun eine Plattform zur Verfügung, die nicht nur Informationen zur Herstellung, Speicherung und Nutzung von Wasserstoff aufbereitet und verteilt, sondern auch aktiv die Koordination und Vernetzung zwischen Forschung und Technik, Hochschule und Industrie betreiben soll.

Internationale Zusammenarbeit

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

- Internat. Leitung des IEA-Projekts *Solar Chemistry (SolarPACES), Task II*
- Internat. Leitung des IEA-Projekts *Photoproduction of Hydrogen and Case Studies of Integrated Systems*

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
- *Anwenderzentrum für Material- und Umweltwissenschaften, Wissenschaftszentrum Umwelt*, sowie *Lehrstuhl für Festkörperchemie*, Universität Augsburg
- *Solarforschungszentrum Odeillo*, Frankreich
- *Solar Energy Research Center, The Weizmann Institute of Science, Rehovot*, Israel
- *Boriskov Institute of Catalysis*, Novosibirsk, Russland
- *Plataforma Solar de Almeria*, Tabernas, Spanien
- *AG Solar*, Nordrhein-Westfalen, Deutschland

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Das Berichtsjahr kann als erfolgreich gewertet werden. Es wurden neben den wissenschaftlich-technischen Fortschritten vor allem mit *HYDRO-POLE*[®] Strukturen geschaffen, die eine bessere Koordination und Effizienzsteigerung der Arbeiten im Bereich Wasserstoffforschung versprechen. Auch die Konzentration auf Schwerpunktthemen und die Förderung von Kooperationen konnten vorangetrieben werden. Neben den Hauptthemen konnte insbesondere mit den Arbeiten zum Thema Druckluftspeicherung interessante Fortschritte erreicht werden. Es scheint, dass diese Technologie optimal mit der Solartechnologie gekoppelt werden kann. Im Rahmen der öffentlichen Verleihung des *Hans-Moppert-Preises* unter der Ägide der Bank Sarasin, Basel, wurde unter anderen das vom BFE geförderte Projekt über **Druckluft als Energiespeicher** [16] ausgezeichnet.

Funktionsmaterialien, die in solarthermischen oder photoelektrochemischen Verfahren, aber auch als Speichermaterialien zum Einsatz kommen, gewinnen für die effiziente und verlässliche Nutzung immer grössere Bedeutung. Dementsprechend wird der Charakterisierung von und der Information über Materialien und deren Eigenschaften ein hoher Stellenwert beigemessen. Dies ist gerechtfertigt, da gerade in den erfolgreichen Projekten die entscheidenden Materialien selbst hergestellt und/oder optimiert

werden. In einigen Fällen geschieht das in institutsübergreifenden Kooperationen. Als weitere vielversprechende Technologien erwiesen sich neu entwickelte, solar betriebene Heissölspeicher, Flüssiglichtleiter sowie Niedertemperatur-Stirlingmotoren. All diese Technologien sind vorerst noch Nischenprodukte, weisen jedoch ein grosses und breit gefächertes Einsatzpotential auf. Es wird jedoch entscheidend sein, die *richtigen* Industriepartner zu finden, die fähig sind, wettbewerbsfähige Produkte serienmässig herzustellen.

Im kommenden Jahr soll *HYDROPOLE*[®] noch stärker etabliert und vernetzt werden, d.h. dass weitere Partner aus Hochschule und Industrie zur Mitarbeit überzeugt werden müssen. Hauptthemen werden die effiziente Bereitstellung, eine sichere Speicherung und ein attraktives Spektrum von Nutzungsmöglichkeiten des Wasserstoffs bleiben. Es ist abzusehen, dass auch eine vertiefte Zusammenarbeit mit den BFE-Programmen Biomasse, Brennstoffzellen und Verbrennung zustande kommt.

Im September 2002 wird in Zürich das *11th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies* von PSI, ETHZ und BFE organisiert. Zu dieser für Hochtemperatur-Solartechnik wichtigsten Veranstaltung werden die weltweit führenden Experten erwartet.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

(ZB) Zwischenbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] M. K. Nazeeruddin und M. Grätzel, (Michael.Graetzel@icp.dc.epfl.ch) EPF-Lausanne: **Generation of Hydrogen by Water Splitting with Visible Light** (JB)
- [4] G. Calzaferri, (gion.calzaferri@iac.unibe.ch) UNI Bern: **Photochemische und photoelektrochemische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie** (JB)

- [5] A. Meier, (annton.meier@psi.ch) PSI Villigen, und E. Bonaldi, **QUALICAL: Solare Herstellung von Kalk** (JB)
- [6] R. Palumbo (robert.palumbo@psi.ch) and A. Steinfeld, (aldo.steinfeld@psi.ch) PSI Villigen: **Solar thermal production of zinc** (JB)
- [7] 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)
- [8] D. Cannavò und T. Gerber, (thomas.gerber@psi.ch) PSI Villigen: **Darstellung und Spektroskopie von ZnO bzw. Zn_xO_y in der Gasphase** (JB)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] B. Schaffner, PSI Villigen, W. Hoffelner, RWH Consult GmbH, Oberrohrdorf und A. Steinfeld, (aldo.steinfeld@psi.ch) ETH Zürich: **Solarthermische Prozesse in der Kreislaufwirtschaft** (JB)
- [12] K. Yvon, (klaus.yvon@cryst.unige.ch) UNI Genève: **Destabilisation of metal hydride complexes and theoretical modelling** (JB)
- [13] A. Züttel und L. Schlapach, (andreas.zuettel@unifr.ch) UNI Fribourg: **Wasserstoff in Kohlenstoffstrukturen und in Metallen** (JB)
- [14] A. Baiker, (baiker@tech.chem.ethz.ch) ETH-Zürich: **Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen Kohlendioxid-Quellen** (JB)
- [15] Th. Kopp, (tkopp@hsr.ch) FH Rapperswil, A. Flück, NEK Zürich und A. Reller, UNI Augsburg: **AMMOTRAP** (SB) ENET 200131
- [16] I. Cyphelly, (cmr@ran.es) Cudrefin: **Quasi-isothermes Füll- und Entladesystem für Hochdruckgasflaschen** (P+D-Projekt, ZB)

Referenzen

- [17] M. Grätzel, **Photoelectrochemical Cells**, Nature, 414, p. 338-344, 2001.
- [18] L. Schlapbach und A. Züttel, **Hydrogen-storage materials for mobile applications**, Nature, 414, p. 353-358, 2001.

BIOMASSE

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2001

Daniel Binggeli & Martin Rügsegger

daniel.binggeli@bfe.admin.ch



Vergasungsanlage Xylowatt im Dauertest

Die erste kommerzielle Holzvergasungsanlage in der Schweiz produziert in einem Sägewerk aus 60 kg trockenen Holzschnitteln pro Stunde 60 kWh Strom und 120 kWh Wärme

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

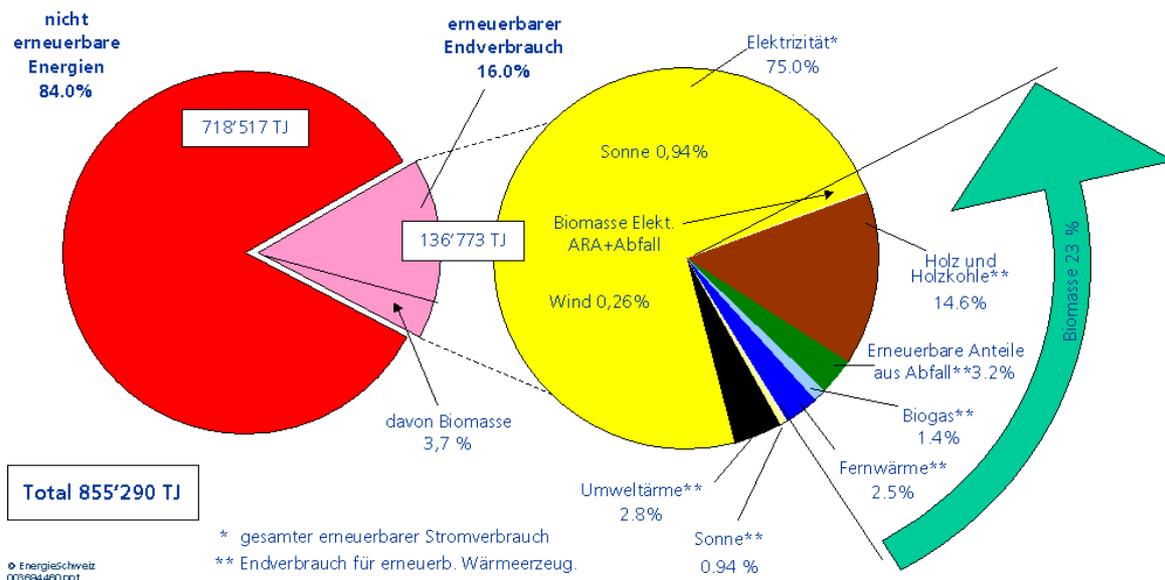
EINLEITUNG

Unter Biomasse wird sämtliches durch die Photosynthese direkt oder indirekt erzeugtes organisches Material verstanden. Wir unterscheiden Biomasse, die eigens für eine energetische Nutzung erzeugt wird, wie Holz, Ölsaaten etc. und organische Reststoffe, die als Abfallprodukte in Industrie, Landwirtschaft, ARA etc. anfallen.

Ziel der BFE-Aktivitäten ist die **Förderung der energetischen Nutzung von Biomasse**. Dieser Energieträger soll möglichst ökologisch und ökonomisch, mit einer maximalen Substitutionswirkung auf fossile Energieträger und mit einer minimalen Umweltbelastung eingesetzt werden. Das Forschungsprogramm Biomasse konzentriert sich auf die Umwandlung von Biomasse in

Wärme, Strom und Treibstoff. Das Programm will mithelfen, dass die Biomasse ihren Anteil an der schweizerischen Energieversorgung stetig erhöhen kann.

Die Energieproduktion aus Biomasse (Fig. 1) erbrachte im Jahr 2000 bereits 3,7% des schweizerischen Gesamtenergieendverbrauchs (thermisch und elektrisch). Zur Energieproduktion aus erneuerbaren Energieträgern trägt die Biomasse somit einen Anteil von 23% bei (Wasserkraft 73%; Sonne, Wind, Umgebungswärme und Geothermie zusammen 4%). Von den neuen erneuerbaren Energien Sonne, Wind, Umweltwärme, Geothermie und Biomasse erbringt im Jahr 2000 die Biomasse gesamthaft sogar 86%.



Figur 1: Anteil der Biomasse an der Endenergie in der Schweiz im Jahr 2000.

Die Bedeutung der Systemgrenze Schweiz, mit der hier maximal verfügbaren Menge an biogenen Gütern, die generell, sowie für energetische Zwecke genutzt werden kann, wurde in letzter Zeit besser erkannt (s. Fig. 2). Die **verstärkte energetische Nutzung der Biomasse kann heute nur über 5 Wege** erfolgen:

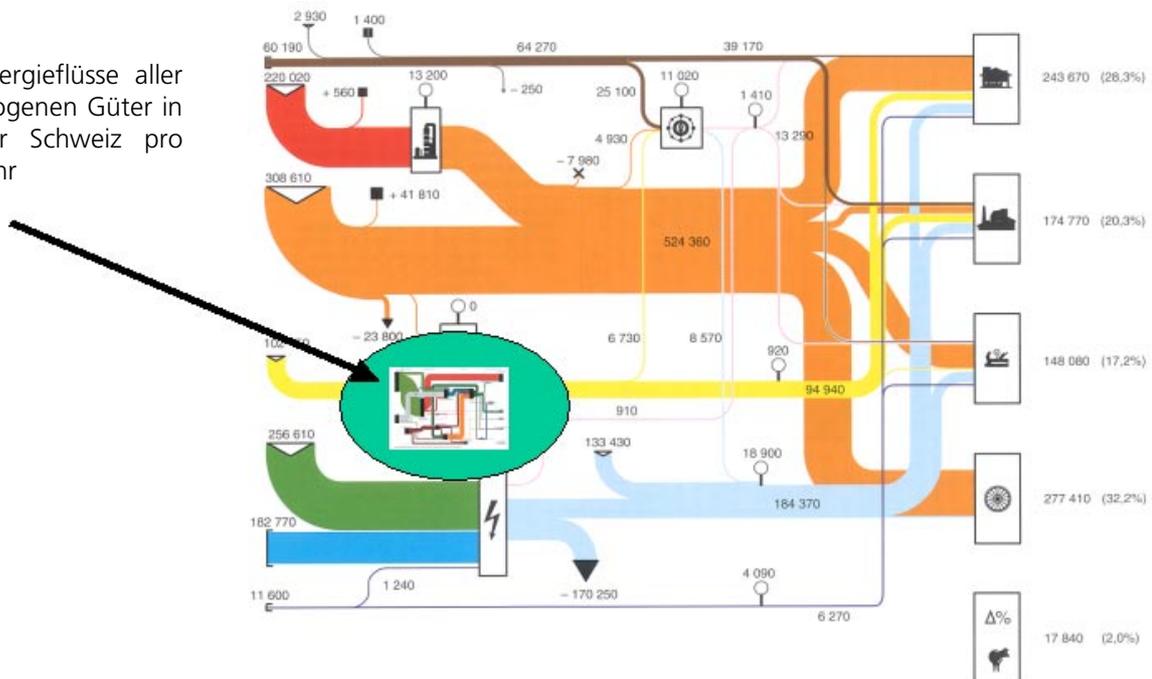
- vermehrte Nutzung der ungenutzten Biomasse aus Wäldern und Brachflächen
- Optimieren der biogenen Stoffflüsse (u.a. Abfälle) unter Berücksichtigung der gesetzlichen Randbedingungen
- Erhöhung und Verbesserung der Gesamtwirkungsgrade bei der energetischen Nutzung von der Ernte bis zur Umwandlung

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

Energieflüsse aller biogenen Güter in der Schweiz pro Jahr



Figur 2: massstäblicher Vergleich der Biomasse-Energieflüsse (in grüner Fläche) mit dem Gesamtenergiefluss der Schweiz im Jahr 2000 (in TWh)

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 definiert unter Berücksichtigung der folgenden Faktoren und Randbedingungen: Die Systemgrenze Schweiz, die gesetzlichen Randbedingungen wie LRV, etc., und das *Konzept der Energieforschung des Bundes 2000 • 2003* [35].

Zur energetischen Nutzung stehen aufgrund der Schwerpunkte folgende biogene Stoffe im Vordergrund: Holz, biogene Industrieabfälle, biogene Siedlungsabfälle, Klärschlamm, landwirtschaftliche Abfälle und Pflanzen aus landwirtschaftlichen Stillgelegungsflächen.

Folgende Prozesse und **Umwandlungstechnologien** stehen im Mittelpunkt: **Verbrennen, Vergasen und Vergären.**

Die Energie aus Biomasse wird im Endverbrauch zum grössten Teil **thermisch** (ca. 90%), **elektrisch** (ca. 9%) und zu einem geringen Anteil als **Treibstoff** (<1%) genutzt.

ANVIERTE ZIELE

Generelles und langfristiges Ziel ist, die Voraussetzungen für die vermehrte energetische Nutzung der Biomasse weiter zu verbessern. Die Möglichkeiten dazu sind: Steigerung der Energieeffizienz, Reduktion der Abgasemissionen, Entwicklung wirtschaftlicher Anlagen, Aufbau und Erhalt einer Qualitätssicherung, Überprüfen und allenfalls Ändern der Rahmenbedingungen. Im Berichtsjahr wurden folgende Ziele anvisiert:

- Grundlagenarbeiten über Partikel, Teere, Pellets und Ökobilanzen weiterführen und erhalten
- Entwicklung von Holzfeuerungsanlagen für Niedrigenergiehäuser vorantreiben
- die Holz-Vergasungstechnologien forcieren
- Know-how für Planung, Bau, Betrieb und Anwendung von industriellen, kommunalen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen ausbauen

- Grundlagen für die energetische Nutzung der nachwachsenden Rohstoffe aus extensiven Anbauflächen fördern
- ökologische und ökonomische Machbarkeit einer energetischen Nutzung von landwirtschaftlichen organischen Abfallstoffen durch Verbrennung in einer Grossanlage untersuchen
- 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

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

BIOMASSE UMWANDELN

a) Biomasse verbrennen und vergasen

Im Projekt **Herstellung und Eigenschaften von Holzpellets als Brennstoff** [1a] wurde der Einfluss von Presshilfsmitteln auf die Herstellung von Holzpellets, deren Eigenschaften während der Lagerung, sowie deren Verbrennungseigenschaften aufgezeigt. Im weiteren wurde mit einer Energie- und Ökobilanz beurteilt, wie hoch die Umweltbelastung der Pelletversorgung für Heizzwecke im Vergleich zu Holzschnitteln und anderen Brennstoffen ist.

Ziel des Projekts **Grundlagen der Aerosolbildung** [1c] in Holzfeuerungen ist die Identifikation der Hauptmechanismen für die Bildung von Aerosolen. Weiter soll untersucht werden, wie diese Mechanismen durch die Betriebsparameter einer Holzfeuerung beeinflusst werden. Im Berichtsjahr wurde der Einfluss von Primärluftüberschuss, Glutbetthöhe, Abgasrückführung und Wasserkühlung des Brennstoffbetts auf die Partikelemissionen an einer 100-kW-Unterschubfeuerung untersucht. Zur Realisierung der geforderten Betriebsarten wurde die Versuchsanlage so modifiziert, dass eine räumlich klar definierte Trennung der verschiedenen Zonen in der Feuerung gewährleistet werden kann, was nach Inbetriebnahme mit Messungen bestätigt werden konnte. Die Resultate zeigen, dass der Luftüberschuss im Glutbett und die davon abhängige Glutbetthöhe in der Anlage mit getrennten Verbrennungszonen einen starken Einfluss auf die Partikelemissionen haben. Die Staubemissionen können zudem durch den Einsatz der Abgasrückführung beeinflusst werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit **Auslegungsgrundlagen für Holzfeuerungen** [2] war die Erarbeitung eines Modells zur Berechnung der Holzverbrennung als Hilfsmittel zur Optimierung

von Feuerungsanlagen. Der Ansatz beruht auf einer Aufteilung der Verbrennung in eine heterogene Feststoffumsetzung auf dem Rost und die nachfolgenden Gasphasenreaktionen im Feuerraum. Der Vergleich von Messungen und Modell bestätigte die Einsatztauglichkeit des Lösungsansatzes. Die Arbeit wurde im Berichtsjahr abgeschlossen und ist in zwei Publikationen [37, 38] dokumentiert:

Die **Systemoptimierung automatischer Holzfeuerungen** [1d] hat zum Ziel, dass bestehende Holzfeuerungen ökologisch und ökonomisch optimal eingesetzt und betrieben werden. Den Schwerpunkt bilden Holzkessel ab 300 kW – 1 MW, die seit mindestens fünf Jahren in Betrieb sind. Beurteilt werden die Bereiche, Brennstoff, Technik und Betrieb in Bezug auf technische und wirtschaftliche Optimierung. Als Verbesserungsmöglichkeit werden betriebliche und logistische Massnahmen aufgezeigt und wo möglich umgesetzt. Für Massnahmen mit Investitionsfolgen werden Potenzial und Kosten aufgezeigt und die Realisierung unterstützt.

Feldmesskampagne Partikelemissionen aus Holzfeuerungen [5a]: Partikel gelten als wichtiger Luftschadstoff. Um eine Aussage über den Feinpartikelaustritt von Holzfeuerungen machen zu können, wurden 14 verschiedene Anlagen unter Praxisbedingungen ausgemessen. Bei Feuerungen mit einer guten Verbrennung stammen über 90% der Partikelfracht aus den Partikelfractionen mit Durchmessern unter 300 nm im lungengängigen Bereich. In allen Feuerungskategorien lassen sich Feuerungen mit geringen Partikelemissionen ausmachen. Die Maxima der einzelnen Feuerungskategorien streuen erheblich.

Auslegung und Optimierung von Holzspeicheröfen [5b]: 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.

Beim Projekt **Entwicklung neuartiger Holz-Hybridheizsysteme** [8] werden Öfen untersucht, die Wärme sowohl direkt an den Raum, als auch an einen Wasserkreislauf abgeben. Die Wärmeübertragung erfolgt in einem Absorber, der wie ein Sonnenkollektor konstruiert ist. Der Absorber befindet sich auf der Aussenseite der Ofenspeichermasse. Die bisherigen Resultate zeigen, dass Speicheröfen mit Wasserabsorbieren interessante Wärmeerzeuger für Niedrigenergiehäuser (MINERGIE, Passiv-Haus) sind. Der Hauptvorteil gegenüber klassischen Speicheröfen sind die steuerbare Wärmeabgabe und die einfache hydraulische Einbindung.

Die Ziele der Vertretungen in der **International Energy Agency (IEA), Bioenergy Task 32 Biomass Combustion and Co-firing** [1b] und **IEA Task 33, Thermal Gasification of Biomass** [3] 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.

Grundlagen zur Teerbildung bei der Holzvergasung [6]: Das Projekt beinhaltet das Studium von Massnahmen zur Minderung von Teeren im Produktgas und deren Beschreibung. Die Resultate von heterogenen Versuchen zeigen, dass mit dem Laborreaktor die Reaktionsbedingungen für Teere in realen Grossanlagen simuliert werden können. Die Arbeiten wurden abgeschlossen und dokumentiert [39].

Im Rahmen des Projekts **Teer- und Partikelmessung gemäss Tar Protocol** [4] wurde die Probenahmeeinrichtung für das Standardverfahren mit gleichzeitiger Beprobung im Roh- und Reingas ausgelegt und realisiert. Um die Einsatztauglichkeit des Verfahrens zu testen, wurden Messungen mit verschiedenen Brennstoffen an einem Vergaser der Firma Xylowatt S.A. durchgeführt. Im weiteren wurden die Teere auf verschiedene Inhaltsstoffe analysiert und die Korrelation zum Gesamtteergehalt bestimmt. Die definitive Fassung des Tar protocol soll im Juni 2002 an der EU-Konferenz in Amsterdam vorgestellt werden.

Ziel des Projekts **Test of different biomass into the IISc open top co-current gasifier** [7] war die Untersuchung der Eigenschaften verschiedener biogener Abfälle. An sieben verschiedenen Stoffen konnte das Leistungspotenzial und die jeweiligen Emissionen getestet werden: Holzschnitzel, Abfallholz, gepresste Sägemehlbriketts sowie Pellets aus Holz, Kaffeeabfällen und Hühnermist. Dabei wurden je nach gewählten Kriterien (Leistung, Wirkungsgrad, Gaszusammensetzung, Partikelaustritt usw.) unterschiedliche Spitzenreiter gefunden.

Mit dem Projekt **Redox-Kreisprozess zur Produktion von reinem Wasserstoff aus dem Rohgas eines Holzvergasers** (Redox-Filter) hätte ein Verfahren entwickelt werden sollen, welches das teer- und partikelbeladene Rohgas in reinen Wasserstoff umwandelt. Das Projekt wurde aufgegeben und neu definiert (siehe Jahresbericht Solarchemie/Wasserstoff).

Ziel der **Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz** [9] ist die Erarbeitung von Zertifizierungsgrundlagen zur Beurteilung verschiedener Holzverstromungsanlagen hinsichtlich ihrer Eignung für eine Auszeichnung *Ökostrom*.

b) Biogene Abfälle vergären

Valorisation énergétique (biogaz) d'huiles comestibles usagées avec différents déchets d'origine agro-alimentaire (OFEN-HUILES) [10]: In dem Projekt wird die energetische Verwertung von Ölabbfällen aus dem Lebensmittelbereich mittels einer Pilotanlage (Co-Vergärungsprozess) auf die technische und wirtschaftliche Machbarkeit hin untersucht.

Ökobilanz von Strom aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen und Klärschlamm-Biogasanlagen in ARA [11, 12]: Ziel dieser

Studien ist, die Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlicher Biogasproduktion und aus Klärschlamm-Biogasproduktion zu bestimmen und damit die Zertifizierungsgrundlagen für die Stromproduktion und der Stromvermarktung zu schaffen.

Vertretung der Schweiz im **IEA Bioenergy Agreement**, [13] **IEA Bioenergy Task 37 Energy from Biogas and Landfill Gas**: 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 AbfalldPONien.

Vertretung der Schweiz im **EU Centre Information Biogaz** [14]: Die ursprüngliche Aufgabenstellung 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 europäischen Institutionen über die Erfahrungen, Möglichkeiten und das Know-how auf dem Gebiet der Vergärung von Abfällen in der Schweiz.

c) Biotreibstoffe

Pflanzenöleinsatz im schnellaufenden, direkteingespritzten PKW-Dieselmotor [15]: Projektziel war die Eignungsprüfung des von W. Mahler entwickelten Verbrennungssystems für

kaltgepresste, naturbelassene Pflanzenöle im schnellaufenden PKW- Dieselmotor mit Direkteinspritzung (Ford Escort). Der Abschlussbericht zeigt, dass sich die engen Verhältnisse im PW-Dieselmotor für die Anwendung des Mahlerverbrennungssystem nicht eignet.

Das BFE finanziert gemeinsam mit der KTI eine Untersuchung zur **Gemischtaufbereitung im Brennraum pflanzenölbetriebener direkteingespritzter Dieselmotoren System Mahler** [16]. Mit diesem Projekt will man versuchen, den Mahler-Motor so zu optimieren, dass er zum Vielstoff-Motor wird.

EINZELPROJEKTE

In der Studie **Rationelle Energieanwendung in der Landwirtschaft / vermehrter Einsatz erneuerbarer Energieträger** [17] wird der Energieverbrauch in der schweizerischen Landwirtschaft aus verschiedenen Datenquellen zusammengestellt und miteinander verglichen.

Fleischverarbeitung in der Schweiz [18]: Mit einer durch die BSE-Problematik bedingten Änderung der Tierseuchenverordnung können seit Anfang 2001 nur noch bestimmte Fleischabfälle als Futtermittel eingesetzt werden. Mit diesem Fütterungs- und Exportverbot hat eine grosse Umlagerung der Fleischabfälle und der Fleischabfallprodukte stattgefunden. Die Studie ist als Instrument bei der Entwicklung von Strategien zur optimalen energetischen Nutzung des hochwertigen Materials gedacht.

Nationale Zusammenarbeit

Die meisten Biomasse-Projekte wurden direkt mit der Industrie und 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 noch teilfinanziert und haben demzufolge ihr Interesse in Eigenleistungen

auszuweisen. Die Gruppe Biomasse an der ETH-Zürich wurde aufgelöst. 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*, *Vergä-*

ung und *Vergärung* sind in unveränderter Art weiterverfolgt worden. Im Berichtsjahr hat die

Schweiz die Leitung des IEA Tasks *Biogasnutzung aus Vergärung und Deponiegas* übernommen. Auch die EU nimmt mit ihren zahlreichen Programmen zukünftig eine immer wichtigere Rolle ein. Doppelspurigkeiten in der Zusammenarbeit mit EU und IEA sind zwar vorhanden, es wird jedoch versucht diese möglichst zu vermeiden. Unter den aufgeführten Internet-

Adressen können zahlreiche Berichte und Informationen heruntergeladen werden:

www.forestresearch.co.nz/ieabioenergy/index.htm

www.ieabioenergy.com/f_tasks.htm

www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37/index.htm

<http://europa.eu.int/en/comm/dg17/prog5/index.htm>

www.ieabioenergy-task32.com/

Pilot- und Demonstrationsprojekte

a) Biomasse verbrennen und vergasen

Ziel des Projektes **APOLLO 2** [19] war eine emissionsarme, übersichtliche und bedienungsfreundliche Pilot-Anlage, die Hühnermist als Brennstoff verwendet zu planen, zu bauen und zu testen. Weiter war eine Ökobilanz und eine Wirtschaftlichkeitsanalyse vorgesehen. Die Gesamtbeurteilung zeigt, dass die thermische Nutzung der Hofdüngerbrennstoffe gleich oder leicht besser abschneiden kann im Vergleich zur konventionellen Verwendung in der Landwirtschaft. Die Wirtschaftlichkeit kann erst ab einer Grösse von zwei Hühnerhallen erreicht werden.

Beim Projekt **Abgaskondensation am Wärmeverbund in Schwanden** [20] konnte die Abgaskondensation noch nicht auf ihre Leistungen getestet werden. Der Holzkessel hatte plötzlich so starke Leistungsschwankungen, dass es nicht möglich war die Kondensationsanlage in einen ruhigen Betrieb zu führen. In der nächsten Berichtsperiode wird nach den Ursachen gesucht und der Leistungstest allenfalls nachgeholt.

Seit einem halben Jahr erzeugt die **Holzvergassungsanlage der Xylowatt SA** [21] Strom und Wärme für ein Sägereiunternehmen (s. Titelbild). Die Verfahrenstechnik des Vergasers wurde auf der Basis einer Zusammenarbeit mit dem *Indian Institute of Science* in Bangalore für einen europäischen Einsatz angepasst. In Indien werden mit diesem Vergaser seit langem biogene Abfälle für die Stromerzeugung genutzt. Diese im Contracting betriebene Anlage eignet sich besonders, weil Holzabfälle kontinuierlich zur Verfügung stehen und ein hoher Bedarf an Strom und Wärme vorhanden ist. Rund 60 kg Holzschnitzel werden pro Stunde zugeführt, um 60 kWh Strom und 120 kWh Wärme zu erzeugen. Diese wird im firmeneigenen Netz für die Holz-trocknung und Gebäudeheizung verwendet. Weitere Projekte an idealen Standorten sind in Arbeit. Die Entwicklungsarbeiten für die Holz-

vergasungsanlage wurden unterstützt durch *Verenum* in Zürich, die beiden Eidg. Technischen Hochschulen (ETH), den Motorenhersteller Liebherr und das Bundesamt für Energie.

Beim Projekt **Optimierung eines Gleichstromvergaser im industriellen Massstab für die Vergasung von feuchten Holzschnitzeln und Altholz sowie Entwicklung der trockenen Gasreinigung** [22] hat es erhebliche Verzögerungen geben. Im Zusammenhang mit der Heizungserneuerung im AC-Zentrum Spiez war es möglich, eine Vergaser-Pilotanlage zu installieren. Die Anlage ist vollständig im System eingebunden, doch konnte sie trotz einigen hundert Betriebsstunden nicht abgenommen werden. Die technischen und wirtschaftlichen Probleme lassen das weitere Vorgehen noch offen.

Beim Projekt **Luftheizung mit Holzofen bei einer EFH-Sanierung** [8b] wurde die alte Heizung mit Oelfeuerung durch eine Luftheizung ersetzt. Die Wärmeenerzeugung für das gesamte Haus erfolgt über den neuen, im Wohnzimmer aufgestellten Holzspeicherofen. Über ein Luftregister gibt der Ofen ca. zwei Drittel der Wärme an die Lüftung ab. Die Erfahrungen zeigen, dass das Konzept nur bei Gebäuden realisiert werden sollte, die annähernd den Passiv-Haus-Standard erreichen.

b) Biogene Abfälle vergären

Bioenergie, Fasern und Protein aus Gras [23]: Diese Demonstrationsanlage mit kombinierter Wertschöpfung aus Biogas (Treibstoff für BHKW und Einspeisung ins Gasnetz), sowie von vermarktbareren Halbfabrikaten (Fasern und Proteinen) soll ein breites Publikum für die wirtschaftlichen und energetischen Möglichkeiten des nachwachsenden Rohstoffes Biomasse sensibilisieren. Die Anlage ging Mitte Jahr in Betrieb.

Perkolationsanlage zur Aufbereitung von Grünabfällen [24]: Das Perkolationsverfahren wurde bereits für Restmüll eingesetzt. Für das Aufbereiten von rein organischen Abfällen zeichnet sich eine zukunftsweisende, kostengünstige Lösung ab. An einer Pilotanlage, die im Frühjahr 2001 bei der Forschungsanstalt Tänikon in Betrieb gehen wird, sollen die nötigen verfahrenstechnischen Parameter erfasst werden.

Mikroturbine 100 kW an Biogasanlage [25]: Um Biogas in Zukunft wirtschaftlicher und effizienter zu nutzen wurde dieses Projekt vom BFE initiiert. Die Mikroturbinen stellen durch ihr grundsätzlich einfaches Wirkprinzip, ihre kleine Baugrösse und die langen Wartungsintervalle eine attraktive Lösung dar. Erste Versuche wurden Ende 2000 erfolgreich durchgeführt und in diesem Jahr werden erste Aussagen über Langzeitverhalten und Betriebskosten und -daten erwartet.

Brennstoffzelle 1-kW-SOFC HEXIS an Biogasanlage [26]: Im Rahmen dieses Projektes wird auf einer landwirtschaftlichen Biogasanlage in Lully (VD) erstmals ein Hochtemperatur-Brennstoffzellensystem des Typs SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*) der Sulzer Hexis AG (Winterthur) mit Biogas betrieben. Eine Vorserie-Brennstoffzelle wird in diesem Versuch während einem Jahr im Einsatz sein. Die Erfahrungen sollen generell, aber auch im Vergleich zu anderen Zelltypen, die Machbarkeit und die mittel-fristig zu erwartende Wirtschaftlichkeit aufzeigen.

Die Vorstudie **Energiebilanz und Biogas-Anlage für die Käserei Bettex in Champtauruz** [27] hat als Ziel nach einer im Jahr 2000 ausgeführten Machbarkeitsstudie eine Biogas-Demonstrationsanlage zur Verarbeitung von jährlich ca. 6'000 t Rinder-, Schweine-, Ziegen- und Pferdemit zu errichten und darauf zu untersuchen, wie das erzeugte Biogas den Energiebedarf des grössten Ziegenkäseproduzenten der Schweiz (Käserei Bettex, Champtauruz) am wirkungsvollsten deckt.

Betriebsauswertung der landwirtschaftlichen Kompaktbiogasanlagen [28, 29]: Die zwei Jahresberichte zeigen 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 sind 8 Anlagen in Betrieb oder kurz vor der Fertigstellung.

Ökostromvermarktung [30]: Ziel dieses Projektes war die Vermarktungserfahrungen von genossenschaftlich organisierten Produzenten von Strom aus erneuerbaren Energien aufzunehmen und zu verarbeiten.

Biogasanlage für die Vergärung von Destillationsrückständen in Kombination mit Abwasserreinigung [31]: Durch Vergärung von Schlempenwasser zusammen mit Produktionsabwasser und anschliessender Verwertung des Biogases wird Heizöl substituiert und das Abwasser vorgereinigt. Die vom BFE mitfinanzierte Demonstrationsanlage in Sursee wurde im Oktober 1999 in Betrieb genommen und anfangs 2000 optimiert. Die abschliessende Messkampagne dauerte von Oktober 2000 bis März 2001. Bei der Pomdor AG in Sursee werden die betrieblichen Abwässer mit einer anaeroben Abwasserreinigungsanlage vorbehandelt und gleichzeitig zur Energieerzeugung genutzt. Die Anaerobanlage wurde so ausgelegt, dass sie, im Gegensatz zu konventionellen Anlagen, bei einer Temperatur von 25 °C betrieben werden kann. Dieses Verfahren so in der Schweiz erstmals eingesetzt und hat sich in der betrieblichen Praxis bewährt. Die Betriebsergebnisse und der Schlussbericht liegen nun vor.

Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle der Co-Vergärungsanlage E. Flachsmann AG [32]: 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, insb. der Behebung des Selenmangels im Feststofffermenter, welcher die Biologie verlangsamt, konnte die Biogasproduktion bereits um erfreuliche 10% gesteigert werden. Weiteres Verbesserungspotenzial ist erkannt und wird umgesetzt.

Vergärung von Biomasse; Auswirkung auf die Abfallwirtschaft des Kantons Tessin [33]: Vorstudie für eine allfällige Grüngutvergärungsanlage: Für die Abfallwirtschaft des Kantons Tessin wurden im Rahmen einer Fallstudie die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen bei einer vermehrten Verwertung der organischen Abfälle mittels Vergärung untersucht.

Ausgehend von einem Referenzszenario ohne Vergärung wurden die Unterschiede bezüglich Investitions- und Nettojahreskosten sowie klimawirksamer CO₂-Emissionen im Vergleich zu einem Alternativszenario mit Vergärung quantifiziert. Die ökonomische Betrachtung zeigt, dass sich die Kosten in den beiden Szenarien kaum unterscheiden. Das Vergärungsszenario besticht allerdings durch eine deutliche Reduktion der CO₂-Emissionen und durch eine gesamthaft höhere Kompostproduktion. Somit kann durch

vermehrte Vergärung bei gleichen Kosten ein deutlicher ökologischer Nutzen erzielt werden.

Biogas Verwertung aus der Lagergrube, Anlage Wartmann Bissegg [34]: Bei einer bestehenden landwirtschaftlichen Biogasanlage wird durch die Abdichtung der Lagergrube und die Nutzung des darin anfallenden Biogases ein erhöhter Ertrag erwartet. Die Messungen sollen das technische, ökologische und ökonomische Potential aufzeigen.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Bei der **Verbrennung** und **Vergasung** von **Holz** konnten interessante Projekte abgeschlossen werden. Diese umfassen: Herstellung und Logistik von Biobrennstoffen, deren Verbrennung und Vergasung sowie Einflüsse auf Anlagen und Umwelt. Weiter wurden Holzfeuerungen grosser Leistung auf Qualität und Wirtschaftlichkeit untersucht und für Niedrigenergiehäuser Systeme entworfen und ausgemessen. Bei der Vergasung könnte sich ein lang erhoffter Durchbruch bei der Umsetzung von Forschungsergebnissen zu Pilotanlagen ergeben.

Die **Verbrennung** von **landwirtschaftlichen Abfällen**: Eine Prototypanlage zur Verbrennung von Hühnermist konnte realisiert werden, eine weitere zur Verbrennung von Hofdünger ist in Planung. Nach einer zweijährigen Betriebsphase sollen die ökologischen Vor- und Nachteile anhand der Messergebnisse diskutiert werden können.

Ökobilanzen verschiedener Anlagen und Vergleiche zwischen der Verbrennung von Holz und von anderer Biomasse konnten für die Zertifizierung zur Ökostromvermarktung durchgeführt werden.

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.

Ein grosser Diskussionspunkt war im Berichtsjahr die Tiermehlverwendung als Brennstoff in der Industrie oder als Alternative dazu die oft vorgeschlagene Vergärung von Schlachtabfällen. Es wurde festgestellt, dass sich die Tiermehlverwertung erfolgreich als Brennstoff nutzen lässt und mit dem Verfahren eine beachtliche Menge fossiler Brennstoffe eingespart wurde. Der

Nachweis ob die Vergärung von Schlachtabfällen ohne Tiermehlherstellung wirtschaftlicher und energetisch wirkungsvoller ist, konnte bis anhin nicht plausibel nachgewiesen werden.

Nachwachsende Ressourcen (NWR): Das Positionspapier des BUWAL über die energetische Nutzung von NWR zeigt deutlich auf, dass die intensive Feld-Bewirtschaftung für *Energiepflanzen* nicht mehr befürwortet wird. Hingegen begrüsst man die energetische Nutzung der *Energiepflanzen* aus extensiv bewirtschafteten Flächen (Wiesen, ökologische Ausgleichsflächen etc.).

Generell wurden die Schwerpunkte weiterhin auf die Resultate der Evaluation *Bereich Biomasse* von 1999 [36] abgestützt. Eine Verschiebung von der vollfinanzierten Forschung hin zu Forschungsbeiträgen, aber auch von der Forschung hin zu einer vermehrten Realisierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen wurde angestrebt. Dies bleibt auch für das Jahr 2002 die allgemeine Stossrichtung. Es ist zu hoffen, dass sich die Industrie vermehrt mittels Beteiligung an Forschungsprojekten engagiert und sich umgekehrt die Forschergruppen Partner in der Privatwirtschaft suchen.

Die **energetische Nutzung der Biomasse** kann **in Zukunft** um Faktor 2 (ohne Übernutzung und Eingriff in die landwirtschaftliche Lebensmittelerzeugung) bis maximal Faktor 3 ausgebaut werden. Beim heutigem Technologiestand und den aktuellen Umwandlungs-Wirkungsgraden könnte das Verhältnis zwischen der aus Biomasse erzeugten Energie und dem Gesamtenergieverbrauch von heute 3,7% auf 7% gesteigert werden.

Die anwendbaren Techniken zur Energiegewinnung aus Biomasse sind weitgehend bekannt

und erprobt. Der zukünftige weitere Ausbau ist jedoch stark abhängig davon, inwieweit es gelingen wird, einerseits verbesserte ökologische und ökonomische Technologien zur Verfügung stellen zu können und andererseits wie sich diese unter verändernden Rahmenbedingungen wie, Luftreinhaltung, Elektrizitätsmarktgesetz, Agrargesetzgebung etc. behaupten können.

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 der Reststoffe. Die Forschung ist gefordert, einfache und geniale Lösungsansätze zu suchen, welche auch ein konkretes Umsetzungspotential aufweisen. Bei P+D-Projekten werden in Zukunft vermehrt Anstrengungen bei der Realisierung von Grossanlagen im Bereich Vergärung und Verbrennung unternommen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden

a) Biomasse verbrennen und vergasen

- [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)**
- [2] C. Bruch u. Th. Nussbaumer (verenum@access.ch), LTNT/ETH-Zürich: **Auslegungsgrundlagen für Holzfeuerungen (SB)**
- [3] R. Bühler (rbuehler@mus.ch), Maschwanden: **Bioenergy Agreement Task 20 Thermal Gasification (JB)**
- [4] P. Hasler (verenum@access.ch), VERENUM, Zürich: **Projekts Teer- und Partikelmessung gemäss Tar Protocol (JB)**
- [5] Ch. Gaegauf (gaegauf@oekozentrum), ÖKOZENTRUM, Langenbruck: **a) Feldmesskampagne Partikelemissionen aus Holzfeuerungen (SB) ♦ b) Auslegung und Optimierung von Holzspeicheröfen (JB)**
- [6] Ph. Morf u. Th. Nussbaumer (verenum@access.ch), LTNT/ETH-Zürich: **Grundlagen zur Teerbildung bei der Holzvergasung (SB)**
- [7] P. Giordano, Xylowatt, *Châtel-St-Denis* (SB) **Test of different biomass into the IISc open top co-current gasifier (SB)**
- [8] H. Huber (hjhuber@hta.fhz.ch), HTA Luzern, Horw (JB) **Entwicklung neuartiger Holz-Hybridheizsysteme (JB) ♦ b) Luftheizung mit Holzöfen bei einer EFH-Sanierung (SB)**
- [9] N. Jungbluth, esu-service, Uster **Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz (SB)**

b) Biogene Abfälle vergären

- [10] Y. Membrez (erep@iprolink.ch), EREP, Aclens: **Valorisation énergétique (biogaz) d'huiles comestibles usagées avec différents déchets d'origine agro-alimentaire (OFEN-HUILES) (JB)**
- [11] . Edelmann u. K. Schleiss, U. Baier, H. Engeli (info@arbi.ch), ARBI, Baar: **Ökobilanz von Strom mit landwirtschaftlichen Biogasanlagen (JB)**

- [12] Ernst A. Müller (mueller.eam@bluewin.ch), Energie & Umwelt, Zürich: **Ökobilanz von Strom aus Klärschlamm-Biogasanlagen** (JB)
- [13] A. Wellinger, NOVA ENERGIE, Ettenhausen: **Vertretung der Schweiz im IEA Bioenergy Agreement, Task 37, MSW Biological Conversion** (JB wurde nicht eingereicht)
- [14] Y. Membrez (erep@iprolink.ch), EREP, Aclens: **Mandat EU Centre Information Biogaz** (JB)

c) Biotreibstoffe

- [15] M. Meyer (martin.meyer@shl.bfh.ch), ARGE, Schweiz. Fachhochschule für Landwirtschaft, Zollikofen: **Pflanzenöleinsatz im schnelllaufenden, direkteingespritzten PKW-Dieselmotor** (JB) (SB ab Mai 02)
- [16] W. Schlachter (w.schlachter@fh-aarau.ch), FH-Aarau: **Gemischtaufbereitung im Brennraum pflanzenölbetriebener, direkteingespritzter Dieselmotoren System Mahler** (JB)

d) EINZELPROJEKTE

- [17] J.-L. Hersener (hersener@agrenum.ch), ARGE REAL, Wiesendangen: **a) Rationelle Energieanwendung in der Landwirtschaft / vermehrter Einsatz erneuerbarer Energieträger** (JB)
- [18] U. Baier (u.baier@hswzfh.ch), K. Scheuerer (k.scheuer@hswzfh.ch), HSW, Wädenswil: **Fleischverarbeitung in der Schweiz** (JB)+(SB)

Liste der P+D-Projekte

a) Biomasse verbrennen und vergasen

- [19] B. Salerno u. J.-L. Hersener, Langenbruck.: **APOLLO 2 Anlage zur Hühnermistverbrennung** (SB)
- [20] L. Bertozzi (bertozzi@raytec.com), H. Baumgartner, Schwanden: **Abgaskondensation am Wärmeverbund in Schwanden** (JB)
- [21] P. Giordano, Xylowatt, Châtel-St-Denis: **Holzvergasungsanlage der Xylowatt SA** (SB Sommer 2002)
- [22] B. Meyer et al, Pyroforce (welcome@pyroforce.ch), Emmenbrücke: **Optimierung eines Gleichstromvergasers im industriellen Massstab für die Vergasung von feuchten Holzschnitzeln und Altholz und Entwicklung der trockenen Gasreinigung** (JB)

b) Biomasse vergären

- [23] Fritz Widmer (etawatt@shpower.ch), BIOENERGIE SCHAFFHAUSEN AG: **Bioenergie, Fasern und Protein aus Gras** (JB)
- [24] Ch. Widmer, G. Schober (gabriele.schober@novaenergie.ch), AFAG/FAT Basel/Tänikon: **Perkolationsanlage zur Aufbereitung von Grünabfällen** (JB)
- [25] Markus Widenhorn, Daniel Würigler, ABB Energie Schweiz/Kompogas AG, Zürich/Glattbrugg: **Mikroturbine 100 kW an Biogasanlage** (JB)
- [26] M. Jenne (markus.jenne@sulzer.ch), SULZER HEXIS AG / Y. Membrez EREP SA / J. Vanherle EPF-Lausanne: **Pilot-Anlage Biogas - HEXIS** (JB)
- [27] Y. Membrez (erep@iprolink.ch), EREP, Aclens: **Bilan öenergétique et avant-projet d'installation de biogaz pour la fromagerie BETTEX, Chaptauraz** (JB)

- [28] T. Böhni (energie-umwelt@econophone.ch), ENERGIE & UMWELT, Frauenfeld: **Kompakt-Biogasanlage I-IV Zusammenfassung und Betriebsauswertung der Anlagen** (JB) (SB) ENET
- [29] T. Böhni (energie-umwelt@econophone.ch), ENERGIE & UMWELT, Frauenfeld: **Kompakt-Biogasanlage V-IX Zusammenfassung und Betriebsauswertung der Anlagen** (JB)
- [30] T. Böhni (energie-umwelt@econophone.ch), ENERGIE & UMWELT, Frauenfeld: **Startphase Ökostromvermarktung** (JB) (SB) ENET
- [31] H. Rudolf (info@holingerag.ch), COLENCO-HOLINGER AG, Baden: **Biogasanlage für die Vergärung von Destillationsrückständen in Kombination mit Abwasserreinigung** (SB) ENET
- [32] 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** (JB)
- [33] G. Beltrani (guido.beltrani@ebp.ch), H.C. Angele, O.Schelske, M. Cavigelli, E.B+P AG, Zollikon: **Vergärung von Biomasse; Auswirkung auf die Abfallwirtschaft des Kantons Tessin** [JB+ SB]
- [34] O. Wartmann (wartmann@active.ch), H. Engeli (engeli@compuserve.ch), engeli engineering, Neerach: **Biogasverwertung aus der Lagergrube, Anlage Wartmann Bissegg** [JB]

Referenzen

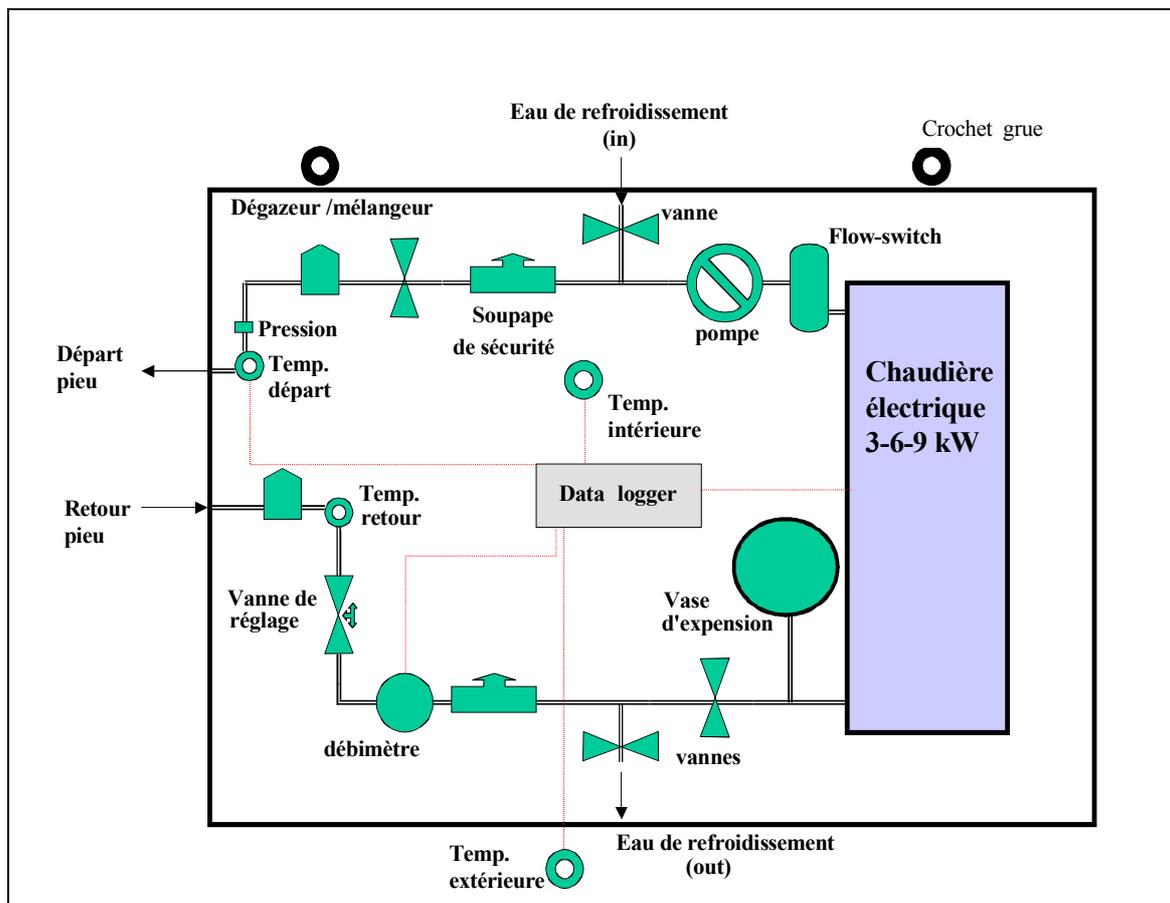
- [35] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2000 – 2003**, ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, www.energie-schweiz.ch/bfe/de/forschung
- [36] J. Kuster, Hanser und Partner AG, Zürich: **Evaluation der Bereiche Biomasse und Verkehr**, November 1999 ENET 190060
- [37] C. Bruch: **Beitrag zur Modellierung der Festbettverbrennung in automatischen Holzfeuerungen**. Diss ETH Nr. 14040, Zürich 2001
- [38] C. Bruch, B. Peters, und T. Nussbaumer: **A general model for the investigation of packed bed combustion with respect to wood**, Progress in Thermochemical Biomass Conversion, Volume I, Blackwell Science, Oxford 2001, 585–598
- [39] P.Morf: **Secondary Reactions of Tar during Thermochemical Biomass Conversions**. Diss ETH Nr. 14341, Zürich 2001.

GEOOTHERMIE

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2001

Dr. H.L. Gorhan

harald.gorhan@ewe.ch; <http://geothermal-energy.ch/>



Schema einer geothermischen Response-Test Apparatur

Für die korrekte Auslegung von geothermischen Grossanlagen ist die Kenntnis der In-situ Wärmeleitfähigkeiten unerlässlich. Obiges Schema zeigt den elektrischen Boiler (3 bis 9 kW), das Expansionsgefäss (50 L), die Umwälzpumpe (0 – 2,5 m³/h) und den Vor- und Rücklauf zum Energiepfahl bzw. zu einer Erdwärmesonde.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Fortsetzung der beiden **Schlüsselprojekte von nationaler Bedeutung**:

- Deep Heat Mining (DHM), inklusive Standort-spezifische Abklärung für Folgeobjekte (z.B. Genf) und Teilnahme am Geothermal Implementing Agreement der IEA.
- Zusammenstellung von Grundlagendaten zwecks Wärmenutzung der beiden AlpTransit Tunnelröhren als Entscheidungsgrundlage für kant. Energiefachstellen und AlpTransit-Gesellschaften.

Auf dem Gebiet **Erdwärmesonden (EWS), EWS-Sondenfelder** und **Geostrukturen** (in erster Linie Energiepfähle) standen die folgenden Forschungsziele im Zentrum:

- Forschung bezüglich Hinterfüllung und Stabilitätsverhalten von Erdwärmesonden tiefer als 300 m. Aufgrund der höheren Quellentemperaturen werden bereits seit einigen Jahren Erdwärmesonden in immer grössere Tiefen verlegt. Wegen des in diesen Tiefen erhöhten wirksamen Erddruckes, müssen neue Konstruktionstypen bzw. Materialien für Sonden und Hinterfüllungen getestet werden.

- Beweisführung über das betriebliche Langzeitverhalten von konventionellen untiefen und übertiefen EWS.
- Forschung über die gegenseitige Beeinflussung von Erdwärmesonden und Energiepfählen (Einhalten von Minimalabständen zur Vermeidung von Interessenskonflikten, d.h. von nachbarlichem *Wärmeklau*).
- Der Kanton Tessin stellt bezüglich der Dichte von EWS-Anlagen noch immer einen *weissen Fleck* in der Schweiz dar. Mit Hilfe der in Arbeit befindlichen geothermischen Karte Tessin soll diesem Problem nachgegangen werden.
- Zur Auslegung von grösseren Erdwärmesondenfeldern und Energiepfählanlagen wird die genaue Kenntnis von Bodenparametern, wie thermischer Leitfähigkeit etc., immer wichtiger. Um diese vor Ort zu messen benötigt man mobile und im Betrieb kostengünstige Messinstrumentarien (z.B. *response test* Geräte, s. Fig. 2). Eine entsprechende Forschungsarbeit ist an der EPFL soeben erst angelaufen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

Deep Heat Mining; Entwicklung der Hot-Dry-Rock/Hot-Wet-Rock Technologie (HDR/ HWR) in der Schweiz; 2001 [1] / Technischer Bericht, Geothermie-Sondierbohrung Otterbach 2, Basel [3]: Die Sondierbohrung Otterbach 2 hat die Standorteignung von Basel nachgewiesen. Die Temperaturverhältnisse zeigen an, dass die Chancen sehr gut sind, in 5'000 Metern Tiefe Formationstemperaturen von mindestens 200 °C anzutreffen (Fig. 1). Die Orientierung des Spannungsfeldes im Kristallin zeigt keine signifikante Abweichung von den bisherigen oberflächennahen Daten.

Die Standortevaluation in Genf wurde programmgemäss weitergeführt. Geologischen Vorabklärungen erfolgten durch ein lokales Geologiebüro. Parallel dazu wurde ein Pflichtenheft für eine UVP vorbereitet.

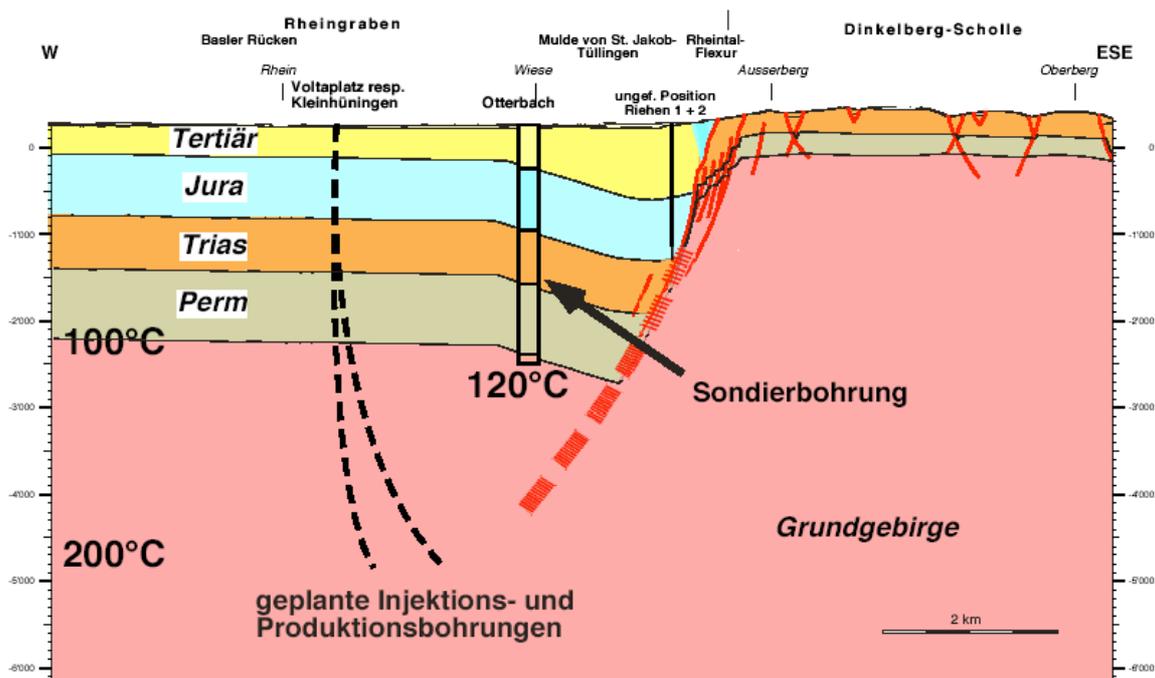
Auf Anfrage des zuständigen kantonalen Departements (DIAE) haben die Industriellen Werke Genf (Services Industriels de Genève, SIG) formell die Teilnahme am DHM Projekt beschlossen.

Zum Standort Aïre haben die Gemeinde Vernier und die Stadt Genf (Grundeigentümer) grundsätzlich positiv Stellung genommen.

Teilnahme am *Geothermal Implementing Agreement der IEA (Annex III, Hot Dry Rock)* [2]. On the organisational side, the year 2002 has seen a consolidation of the structure, together with its further development into new Annexes and, on the technical side, a steady continuation of the work on the two following themes defined:

- data collection and organization for specific sites and projects
- definition of data required for a generic HDR project.

Over the past three years, the concept of the generic project has been built up. Data requirements for the early stages of planning a realistic HDR-plant are added continually, and in 2001 work has started on the construction of a means of presenting and viewing the data requirements.



Figur 1: Bohrung Otterbach: geologische Strukturen und Tiefentemperaturen

Potentiel géothermique et possibilités d'utilisation des eaux des tunnels de base d'Alp-transit. État des investigations [4] / Statusbericht Wärmenutzung warmer Tunnelwässer aus dem St. Gotthard und Lötschberg – Basistunnel [5]. L'état d'avancement des chantiers des deux tunnels de base laisse prévoir leur mise en service en 2007 pour le Lötschberg et en 2013 pour le St-Gothard. En phase d'exploitation, les estimations laissent envisager des débits d'eau utilisables entre 80 et 250 L/s, en fonction des venues d'eau réelles et des travaux d'étanchement effectués dans les tunnels. Les températures des eaux attendues aux portails sont estimées entre 18 et 24 °C [36], si bien que le potentiel thermique utilisable à chacun des quatre portails se situe entre 5 et 18 MW, soit un total de l'ordre de 40 MW.

Lebensdauer von EWS in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung [6]: Dieses Projekt hat gezeigt, dass die Erdwärmesonde ein sehr robuster Bauteil ist, wenn die entsprechenden Auslegerichtlinien nach VDI 4640 [33] oder nach der Broschüre *Geothermie, praktische Nutzung von Erdwärme* [34] beachtet werden. Die Lebensdauer liegt in der Grössenordnung des Gebäudes selber, dabei sind aber keine Unterhaltarbeiten und Renovationen notwendig. Bei krasser Überbelastung kann eine EWS jedoch versagen. Bei druckfestem, nicht bindigem Un-

tergrund (z.B. Sand-, Kies-, Schotter-Gemischen) besteht die Gefahr, dass die EWS abgeklemmt wird. Besteht der Untergrund aus bindigem, duktilem Material (Lehm, Schluff, Silte, Feinsande), so kann durch die Eisbildung der Untergrund verdrängt werden, und es kann zu Trichterbildungen kommen. In einigen Fällen konnte auch beobachtet werden, dass die Sonde durch die anhängenden Eismassen abgerissen wurde.

Zusammenfassend konnte nachgewiesen werden, dass eine EWS bei richtiger Anwendung ein äusserst robuster Bauteil mit sehr langer Lebensdauer ist. Dadurch kann mit geringem Energieaufwand eine sehr grosse Menge an erneuerbarer Energie aus dem Untergrund schonend und nachhaltig gewonnen werden.

Langzeitverhalten der Erdwärmesondenanlage Elgg [7]: Das Betriebsverhalten der Anlage (nur Beheizung) wird seit 1986 messtechnisch überwacht. Dabei zeigte es sich, dass die Untergrundtemperaturen, gemessen jeweils unmittelbar vor Beginn der neuen Heizperiode, über die letzten Betriebsjahre stabil blieben. Dies auf einem Niveau, welches ca. 1,8 K tiefer liegt als vor der ersten Inbetriebnahme im Dezember 1986. Extrapolationen aufgrund von (geeichten) Modellrechnungen zeigen des weiteren, dass selbst nach 50 Betriebsjahren praktisch keine weitere Abkühlung des Untergrundes stattfinden wird.

Tiefe Erdwärmesonde Weggis – Messkampagne zur Dokumentation der neuen Einflüsse beim Ausbau der Abnehmerleistung [8]: Die tiefe EWS Weggis (2'281 m) wurde 1994 in Betrieb genommen. In den Jahren 1995 bis 2000 lieferte sie jährlich eine Wärmemenge von rund 220 MWh für Direktheizung sowie als Quelle für Wärmepumpen (WP) zur Heizung und Warmwasseraufbereitung. Der direkte Heizungsanteil lag bei über 60%. Die Abnehmerleistung hat rund 100 kW betragen. Die Quelltemperatur der Tiefensonde hat bei gut 40 °C und die Rückgabetemperatur bei knapp 35 °C gelegen.

Im Laufe des Betriebsjahres 2000/2001 wurde die Abnehmerstruktur um drei Mehrfamilienhäuser erweitert. Dadurch hat sich die Abnehmerleistung praktisch verdoppelt. Die dem Sondenkreislauf entnommene Wärme hat sich ebenfalls auf 420 MWh verdoppelt. Die Quelltemperatur der Tiefensonde liegt nun bei knapp 40 °C und die Rückgabetemperatur bei rund 30 °C. Nach bald acht Jahren Betriebsdauer funktioniert auch diese Anlage erwiesenermassen (tatsächliche Messwerte) tadellos.

Long Term Influence of Multiple Heat Extraction Bore Holes [9]: Due to the increasing density of borehole heat exchanger (BHE) systems in Switzerland, their mutual influence needs to be investigated. Depending on the number of systems involved, it may take from several tens up to several hundred of years for typical BHE lengths of ~100m before they start influencing each other. There is however a need to account for their long term influence since this situation is supposed to occur more often in future, as the number of ground coupled heat pump systems (GCHP system) steadily increases with time. Since it is difficult to collect measurements of thermally interacting BHE under these conditions, only simulation programs will provide a solution to this problem. This topic needs also to be studied to discuss themes such as *neighbours rights* or sustainability related to GCHP system.

Geothermische Karte Tessin. Wärme aus Boden und Wasser – Kanton Tessin [10]: Der Grundgedanke des Projektes ist es, einen Beitrag zu einer besseren Verbreitung der Geothermie im Tessin zu leisten. Dazu soll ein elektronischer Datenträger hergestellt werden, der in ansprechender Form Informationen zum Thema Geothermie enthält. Berücksichtigt werden Projekte zur Gewinnung von Wärme aus Boden (Erdwär-

mesonden, Erdregister und Energiepfähle) und Grundwasser. Als Datenträger kommen CD-ROM und eventuell das Internet in Frage. Ein weiterer zentraler Teil des Projektes ist die Bestimmung der thermischen Parameter der wichtigsten Gesteine im Tessin. Die Herstellung der dazu nötigen Apparaturen sowie die Messung der Gesteinseigenschaften werden an der lokalen Fachhochschule der italienischen Schweiz (SUPSI) ausgeführt, um den Aufbau von lokalem Know-how zu fördern.



Figur 2: Appareillage pour le test de réponse

Finalisation du module de l'EPFL pour les tests de réponse [11]: Les buts du projet sont:

- L'optimisation des dimensions de ce module de chauffage, afin de faciliter son transport. Idéalement l'appareillage devrait être palettisable et être équipé pour sa manutention par des transpalettes ou par des élévateurs sans risque d'endommagement des composants. Cette optimisation nécessite la reconstruction totale du module (fig. 2).
- La qualité des mesures devrait être identique, voire supérieure par une isolation thermique grandement améliorée de tous les composants et une diminution des pertes de charges dans la tuyauterie.
- Une gamme plus étendue de puissance sera également à disposition pour ce nouveau module

Des tests d'étalonnage et de contrôle de ce module sont prévus, de même que l'étalonnage de tous les capteurs installés. L'automatisation des mesures ainsi que du test est également prévue

avec une acquisition automatique des données telles que les températures (4 capteurs), le débit, la consommation électrique au moyen d'un data-logger et d'un ordinateur portable pour le transfert des données.

L'accréditation selon l'EN 45'000 de l'essai de test de réponse pour sondes géothermiques est également prévue dans le cadre de cette requête. Elle nécessite l'établissement d'un mode opératoire détaillé et de procédures d'étalonnage des capteurs et du module très précises. Ce module de chauffage pour les tests de réponse des sondes géothermique sera le seul appareilla-

ge fonctionnel en Suisse avec de telles performances. Dans sa conception future, il pourra être facilement transporté sur les emplacements prévus pour des essais pour être raccordé à toutes futures sondes. Cet appareil est également performant pour tester les projets de stockage de chaleurs dans les sols au moyen de géostructures (pieux thermiques par exemple). Tous les projeteurs et réalisateurs suisses de constructions d'échangeurs de chaleur dans le terrain pourraient profiter de cette installation pour déterminer la conductibilité thermique des sols pris en compte

Nationale Zusammenarbeit

Im Jahr 2001 wurden vom **SVG drei Bulletin-Nummern** veröffentlicht, die auch im Ausland Beachtung fanden. Nebst eher wissenschaftlichen Artikeln und technischen Beschreibungen von verschiedenen geothermischen Anwendungen, finden sich auch Ankündigungen über Fachvorträge, Kongresse, etc. im In- und Ausland. Des weiteren bietet das Bulletin die Möglichkeit für Firmenannoncen aus der Geothermie Branche (z.B. Bohrfirmen, EWS-Installationsfirmen, etc.)

Die komplett neugestaltete Homepage www.geothermal-energy.ch hat mittlerweile einen beachtlichen Bekanntheitsgrad erreicht und führte zu zahlreichen Anfragen sowohl aus dem In- als auch dem Ausland. Von mehreren Projektmandanten wurden zudem Presseartikel und Beiträge für Fachzeitschriften verfasst.

Im Zuge der Projektabwicklung im Berichtsjahr, wurde mit den folgenden Schweizer Institutionen aufs engste zusammengearbeitet:

- **Universitäten und Fachhochschulen:** Institut für Geophysik der ETHZ, Centre d'hydro-

géologie de l'Université de Neuchâtel, Département de génie civil, Institut des sols, roches et fondations de l'EPFL, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie de l'Université de Genève, Istituto Scienze della Terra, Laboratorio di energia, ecologia e economia della Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana, Haute École valaisanne (HEVs) und der Fachhochschule Burgdorf;

- **Stromindustrie:** BKW, ATEL, Elektra Basel-land, Industrielle Werke Basel (IWB)
- **Agenturen und Fachverbände:** Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz (AEE), Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW), Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS)
- **Energiefachstellen:** Zusammenarbeit mit alle Energiefachstellen in der Romandie und im Tessin und mit denjenigen der grösseren deutschsprachigen Kantonen;
- **Zahlreiche Stadt- und Gemeindevertretungen.**

Internationale Zusammenarbeit

Die Teilnahme am **Geothermal Implementing Agreement der IEA** ist im Kapitel *durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse* beschrieben. Im Kontext dieses Projektes sind die folgenden Aktivitäten von Herrn Prof. L. Rybach erwähnenswert:

Chairman des Geothermal Implementing Agreement (GIA) Executive Committee.

- Abfassen des *GIA Annual Report 2000* (zusammen mit J. Garnish, ExCo Secretary)
- Vorbereitung von neuen Annexen (*VI: Power Generation, VII: Drilling Technology, VIII: Direct Use, IX: Market Acceleration*)
- Vertretung der GIA bei der REWP (Paris, 23.1.2001, 4.4.2001)

- Co-Chairman, GIA-GEF (*Global Environmental Facility* der Weltbank) Alliance meeting (Brussels, 7.3.2001)
- Vorbereitung und Leitung des 6th GIA ExCo meeting (Brussels, 8./9.3.2001)
- Ausarbeitung des GIA End of Term Report (zusammen mit *J. Garnish*, ExCo Secretary)
- Vertretung der IEA beim DANCEE Workshop *Future of Geothermal Energy in Central and Eastern European Countries* (Copenhagen, 8./9.10.2001)

Des weiteren war Herrn Prof. *L. Rybach* in der *International Geothermal Association (IGA)* wie folgt aktiv tätig:

- Abschlussarbeiten als Chairman, *WGC2000 Organizing Committee (OC)*
- Vorbereitung und Leitung der letzten OC meetings (Ankara, 26./27.2.)
- Sitzung mit dem *Turkish Organizing Committee (TOC)* for WGC2005 (Ankara, 27.2.)
- Kompilation und Redaktion des *Turnover Manuals Review of WGC2000 Organization and Suggestions for WGC2005 Committee*

- Ausarbeitung des *Memorandum of Understanding (MOU) between TOC and IGA*
- Kandidat für Board of Directors (BoD) Election für die Amtsdauer 2001-2003 (gewählt mit der zweithöchsten Stimmenzahl aus 60 Kandidaten)
- Wahl zum IGA Vice President

In verschiedenen europäischen Ländern hat Herr Prof. *L. Rybach* Vorträge gehalten; an der Universität Oradea wurde er zum Honorarprofessor ernannt.

Die beiden folgenden **EU- Geothermie- Programme** wurden vom *Bundesamt für Bildung und Wissenschaft (BBW)* finanziell unterstützt:

- ***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).

Pilot- und Demonstrationsprojekte

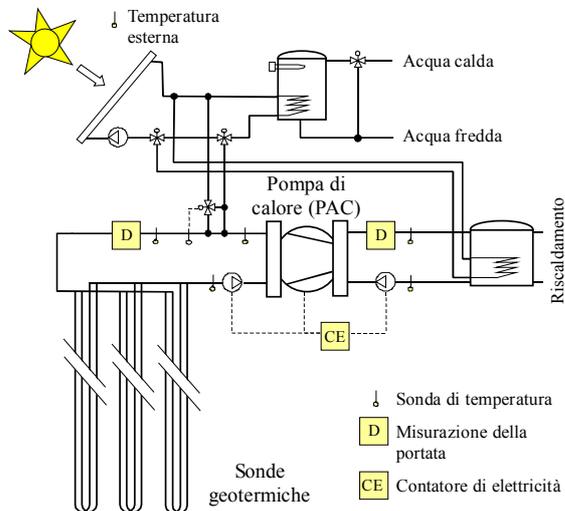
Demonstrationsprojekt zum Effizienzvergleich zwischen konventioneller (tiefer) EWS und der Neuentwicklung einer Regenschirm-Erdwärmesonde [12]: Beim Neubau des CAS Gebäudes in *Wattwil*, Kanton St. Gallen, wurden vier Erdwärmehohrungen à 250 m (EWS 1, 2, 4) und eine Erdwärmehohrung à 230 m (EWS 3) abgeteuft. Dabei wurden in den beiden Bohrungen EWS 1 und 2 zwei herkömmliche Doppel-U-Sonden (*Duplex-Sonden*) und in den Bohrungen EWS 3 und 4 zwei neuartige, von der Firma *NEK Umwelttechnik* entwickelte Regenschirmerdwärmesonden eingebaut. In Zeitreihengrafiken der Temperaturen der beiden Bohrungen EWS 4 und EWS 2 konnte nachgewiesen werden, dass, auch lokal, bis zum Vorliegen des ersten Zwischenberichtes keine thermische Übernützung vorlag. Die Auswertung der Temperatur-, Druck- und spezifischen Leistungsdaten ergab insbesondere, dass die Leistung der Sonden mit den bis zu diesem Zeitpunkt gefahrenen Einstellungen massgeblich von der Durchflussmengenvariation abhängig war. Eine eindeutige Überlegenheit eines der beiden Sonden-

typen konnte noch nicht schlüssig nachgewiesen werden.

Mesure des performances thermiques d'une pompe à chaleur sur sondes géothermiques avec recharge partielle à Lugano [13]: Grâce à Monsieur *L. Ferrari*, président de *GESTI (Groupe Energie Solaire du Tessin)*, ce projet à pu voir le jour. Comme on a du changer la pompe à chaleur, qui utilisait l'air comme source froide, on a profité de cette occasion pour faire installer une pompe à chaleur couplée à trois sondes géothermiques pour utiliser le rocher comme source froide. Ce projet offre l'occasion unique de mesurer les performances thermiques d'une installation pilote de pompe à chaleur sur sondes géothermiques, combinée avec des capteurs solaires pour la recharge partielle du terrain en été par les gains solaires non utilisés (fig. 3).

Les principaux résultats du projet sont la planification et la mise en place des appareillages de mesure, comprenant également l'étalonnage des capteurs de température. La qualité des mesures effectuées permet d'établir un bilan énergétique précis de la pompe à chaleur et des sondes géo-

thermiques dont les premiers résultats sont présentés. Elles permettent en outre de montrer les bonnes performances du système, même si le réglage des températures de consigne pour le chauffage n'est pas encore achevé.



Figur 3: Schéma de principe de l'installation Ferrari, Lugano

Wirtschaftlichkeitsermittlung einer Sondensolation im obersten Abschnitt einer EWS-Anlage in Otelfingen [14]: Für die Beheizung von zwei Doppel-Einfamilienhäusern wird geothermische Energie verwendet. Die bisherigen Messungen haben ergeben, dass eine in den oberen Abschnitten isolierte EWS wärmetechnisch besser abschneidet als eine nicht isolierte. Der tatsächlich wirtschaftlich-technische Gewinn kann aber erst nach der nächsten Heizperiode eruiert werden.

WP – Anlage Chestonag Automation AG, Seengen AG [15]: Im Zusammenhang mit dem Umbau eines ehemaligen Fabrikgebäudes zu Büroräumlichkeiten, wurde 1999 eine neue umweltfreundliche Heizanlage mit integriertem Kühlungssystem (Free-Cooling System) eingerichtet. Hierzu wurden insgesamt 4 Bohrungen à 250 m Tiefe realisiert. Die mit den Erdwärmesonden gekoppelten Wärmepumpen (5 Stück à 14 kW) entziehen im Winter dem Erdreich die benötigte Wärme. Im Sommer wird die Betriebswärme unter Umgehung der Wärmepumpen gleichmässig über die 4 Erdwärmesonden dem Erdreich zugeführt. Um die Einflussnahme der atmosphärischen Bedingungen der obersten Bodenbereiche sowohl beim Wärmeentzug (tiefe Bodentemperaturen) wie auch bei der Wärmerückgabe im Sommer (hohe Bodentemperaturen)

auszuschliessen, wurden bei den Sonden die obersten 8 m und die Zuleitungen zum Haus isoliert. Mit den bis jetzt erhobenen Daten lässt sich erkennen, dass die Anlage in der Heizperiode effizient arbeitet ($\frac{1}{4}$ Strominput zu $\frac{3}{4}$ Wärmeentzug). Im Free-Cooling Betrieb wird die Betriebsabwärme über die gesamte Sondenlänge zurückgegeben. Nach einer Anfangsphase, in welcher aufgrund der anfänglich tiefen Sonden-temperaturen vor allem in den tieferen Bereichen der Sonde viel Betriebsabwärme ins Erdreich gelangt, wird in der späteren Phase hauptsächlich in den oberen Bereichen der Sonde (90 • 100 m Tiefe) Wärme zurückgegeben. Ein Vergleich der Sondentemperaturen untereinander zeigt, dass sowohl in der Heizperiode wie im Free-Cooling Betrieb sehr ähnlichen Werte auftreten.

Pieux énergétique avec distribution de chaleur et de froid intégrée dans la structure : Centre Scolaire Vers-l'Église / Fully [16]: Cette nouvelle école fut réalisée en conformité avec le Standard Minergie. En raison de la qualité médiocre du sous-sol, la construction a été fondée sur des pieux. Ces derniers sont équipés en échangeurs thermiques, selon le principe des pieux énergétiques, et servent au chauffage et au refroidissement du bâtiment.

Les premières mesures effectuées durant l'année 2001 ne permettent pas encore de tirer des conclusions très réalistes, particulièrement pour la saison froide, d'une part du fait que le bâtiment était inhabité ou même partiellement en phase de construction. Cependant, quelques tendances s'y dégagent. L'installation en place présente des coefficients de performance de l'ordre de 5, sans comptabilisation des énergies auxiliaires, et de 4 tout compris. Le fonctionnement estival permet de recharger une bonne partie de la source froide tout en maintenant un confort intérieur remarquable. L'inertie thermique du bâtiment favorise également le bon maintien des consignes de température. Finalement, la fréquence d'enclenchements / déclenchements des compresseurs est faible, ce qui favorise grandement leur durée de vie.

Dock Midfield de l'aéroport de Zürich: mesure et optimisation des performances thermiques du système avec pieux échangeurs [17]: Dieses auf (Energie-) Pfählen (Fig. 4) stehende Flughafengebäude ist nun fertig erstellt, und ab Frühjahr 2002 kann mit der Erfolgskontrolle (Messkampagne) der Wärme-Kälteproduktion aus der *Energiepfählanlage* begonnen werden.



Figur 4: Baustelle Dock Midfield: Einbringen der Energiepfähle

Regionalgefängnis Rheintal, Altstätten, SG: Beheizung und Klimatisierung mittels Energiepfählen, gekoppelt mit Erdwärmesonden, Erfolgskontrolle [18]: Das Hochbauamt des Kantons St. Gallen erstellt in *Altstätten* im Gebiet *Hadler* ein neues Regionalgefängnis. Die Energieversorgung des Gebäudes erfolgt monovalent über alternative Energiequellen. Dazu werden einerseits die gerammten Pfähle als Energieträger genutzt, andererseits zusätzlich 6 Erdwärmesonden abgeteuft. Zur Qualitätssicherung wurde unmittelbar nach Fertigstellung der Horizontalanbindung das System unter Druck von 8 bar gesetzt, um allfällige Leckagen vor den Betonierarbeiten frühzeitig zu erfassen. Dieser Druckzustand wurde bis einige Tage über den Betonierzeitpunkt der jeweiligen Etappe aufrechterhalten und periodisch überwacht. In keinem der kontrollierten Kreisläufe wurde ein Druckverlust festgestellt. Die Inbetriebnahme des Gebäudes und der damit verbundene Beginn der Erfolgskontrolle (Messungen über zwei volle Heizperioden) werden anfangs 2002 erfolgen.

Demonstrationsprojekt zur Energieeffizienz einer grossen Wohnüberbauung (Unteres Hompeli, SG) im Minergie-Standard, deren Wärmebedarf monovalent durch ein Feld tiefer Erdwärmesonden abgedeckt wird [19]: Die Versicherungskasse des Kantons St. Gallen baut in St. Gallen -Ost eine neue Wohnüberbauung, bestehend aus 4 grossen Mehrfamilienhäusern, die über eine gemeinsame Tiefgarage miteinander verbunden sind. Die Wärmeversorgung der im Minergie-Standard projektierten Gebäude wird über ein monovalentes Erdwärmesondensystem erfolgen, wobei jedes Haus eine eigene Heizzentrale aufweist. Die Planung sieht folgende Eckdaten vor:

- Gebäude 1: QH = 30 kW, 2 EWS à 250 m Tiefe
- Gebäude 2: QH = 38 kW, 3 EWS à 220 m Tiefe
- Gebäude 3: QH = 44 kW, 3 EWS à 250 m Tiefe
- Gebäude 4: QH = 33 kW, 2 EWS à 275 m Tiefe

Die gesamte Energieversorgung erfolgt für alle 4 Gebäude monovalent, d.h. ohne Sicherheits- oder Backupsystem. Die Auslegung des Erdwärmesondenfeldes (10 Bohrungen) erfolgte mit dem *eed- Programm*. Ziel des Projektes ist es abzuklären, inwiefern sich im Erdwärmesondenfeld die einzelnen Sonden (Durchmesser: 40 mm, Doppel- U) gegenseitig beeinflussen und wie schnell sich der Untergrund (Molassefels) nach dem Wärmetzug wieder regenerieren kann. Mittels eines Vergleiches der *eed- Auslegung* sowie eines Response-Tests soll die Auslegung des Sondenfeldes validiert werden. Mit den Untergrundarbeiten konnte begonnen werden. Die für die Erfolgskontrolle nötige Instrumentierung wird im kommenden Frühjahr erfolgen.

Zweijährige Erfolgskontrolle (Messkampagne) der Grundwasser-Wärmepumpen-Anlagen Pfarrhaus Bremgarten [20], bzw. der Wohnsiedlung Winkel in Remigen (AG) [21] und Feuerwehrmagazin und Wohnungen Sisseln, AG [22]: In drei Grundwasser-Wärmepumpen Anlagen (Grundwasser hoch bei der Anlage *Sisseln*, Grundwasser tief bei der Anlage *Remigen*, bzw. Grundwasser in unmittelbarer Nähe eines Oberflächengewässers bei der Anlage *Bremgarten*) wird je ein entsprechendes Messsystem eingerichtet. Dieses ermittelt Grundwasserstand und -temperatur sowie den Wärmetzug bei dem Entnahmebrunnen, den Wärmebedarf im Sekundärkreislauf und den Strombedarf für den Verdichter der Wärmepumpe. Zusätzlich wird ein Betriebsstundenzähler eingesetzt und die Rücklauftemperatur unmittelbar vor der Rückgabe ins Grundwasser ermittelt. Mit diesem Messsystem ist es möglich, für die jeweilige Anlage eine Wärmebilanz zu erstellen und so die Effizienz der jeweiligen Anlage zu ermitteln, um diese dann untereinander vergleichen zu können. Weitere Faktoren, wie direkte Entnahme und Rückgabe ins Grundwasser oder das Versickern des Grundwassers, können ebenso bilanzmässig erfasst werden. Mit Beginn der entsprechenden Erfolgsmessungen wird im Frühjahr 2002 begonnen.

Geothermie Contracting Solar One, Itingen, BL [23]: Die geothermische Dubletten-Anlage der *Siedlung Solar One* in Itingen BL ist das Resultat eines vom BFE und dem Kanton Baselland

unterstützten Pilotprojekts für ein geothermisches Wärmeversorgungskonzept *im Heat-Contracting* Verfahren. Die Anlage besteht aus einer Dublette (Entnahme- und Rückgabeburgen), welche Felsgrundwasser des *Oberen Muschelkalkes* in einer Tiefe von 265 m erschliesst. Zurzeit werden sechs Wohneinheiten mit Wärme und Warmwasser durch geothermisch produzierte Wärme versorgt. Die Überbauung eines benachbarten Baugeländes ist in Planung. Der Anschluss an die Geothermie-Dublette wäre sinnvoll, da noch genügend geothermische Energie vorhanden wäre. Die Anlage ist zurzeit bei weitem nicht ausgelastet. Die Konzession wurde mit folgenden Auflagen bewilligt:

- Max. Wasserentnahme 5 L/s
- Abkühlung ($T = 12\text{ K}$)

Die Leistung der Wärmequelle mit den entsprechenden Installationen (Unterwasserpumpe auf 100 m) und der Ergiebigkeit von 5 L/s bei einer Absenkung von 50 m beträgt insgesamt 250 kW. Der Ausbau der Siedlung und dementsprechend der Heizanlage erfolgt stufenweise. Zur Drosselung der Fördermenge ist die Unterwasserpumpe frequenzgesteuert. Im jetzigen Betrieb übersteigt die Fördermenge kaum 2 L/s. Dem Grundwasser, das mit 22 °C in den Wärmetauscher eintritt, werden maximal 7 K entzogen. Die Grundwasserfassung sowie die Rückführung funktionieren einwandfrei.

Geothermische Wärmepumpe, Schulhaus Egelsee, Kreuzlingen [24]: Für den Badebetrieb ist die jetzt zugeführte Thermalwassermenge ideal. Zudem ist der Stromverbrauch für die Bohrlöschpumpe bei der einregulierten Fördermenge von ca. $60\text{ m}^3/24\text{ h}$ und dem sich einstellenden Wasserstand von max. 100 m u. T. tief. Da weder Menge noch Temperatur auf die Wärmepumpe grossen Einfluss haben, sollte der Badebetrieb die 1. Priorität behalten. Die WP-Anlage konnte die erwünschte Substitution von nichterneuerbaren Energien durch Abwärmenutzung erhöhen. Bis heute wurden rund 110 MWh aus dem Abwasser gewonnen, bzw. 131,1 MWh Nutzwärme erzeugt. Bei Fördermengen von $30\text{ - }73\text{ m}^3/24\text{ h}$ schwankt die Temperatur im Normalbetrieb zwischen $23,1\text{ und }27,9\text{ °C}$. Diese Temperaturschwankungen sind praktisch nur von der geförderten Wassermenge abhängig, welche direkt die Höhe des Wasserstandes im Bohrloch beeinflusst. Dieser Einfluss zeigt sich deutlich bei Beckenfüllungen nach den Sommerferien, wenn die max. mögliche Wassermenge gefördert wird und dabei der Wasserstand von

ca. 100 m auf 175 bis 190 m u. T. absinkt. Dabei steigt die Wassertemperatur um bis zu max. $5,9\text{ °C}$. Die Jahreszeit bzw. Aussenlufttemperatur hat praktisch keinen Einfluss auf diese Temperatur. Die Auskühlung des Thermalwassers vom Bohrloch bis Eintritt ins Hallenbad Egelsee liegt zwischen $0,4\text{ und }0,8\text{ °C}$. Diese Schwankungen sind kaum Jahreszeitabhängig, sondern werden grossteils durch die geförderte Wassermenge beeinflusst.

Exploitation du forage géothermique JAFE de Saillon [25]: L'exploitation du forage géothermique JAFE permet d'alimenter les consommateurs de chaleur, à savoir l'école de Saillon et les Bains de Saillon. Malgré une considérable amélioration de la productivité du forage (débit de 350 L/min à 31 °C), mise en évidence par les tests de pompage effectués après l'acidification du forage et lors de la mise en production (dès juin 1999), des problèmes de précipitation chimique n'ont pas permis d'alimenter le principal consommateur, c'est-à-dire, les Bains de Saillon. Ce problème n'a malheureusement pas pu être résolu en 2001. Il est à relever cependant que le chauffage de l'école de Saillon au moyen de l'énergie géothermique fonctionne à satisfaction depuis la mise en service de l'installation.

Exploitation du nouveau forage géothermique P600 de Lavey-les Bains [26]: Le forage géothermique profond de Lavey-les Bains a été réalisé au cours de l'été 1997. Basé sur les résultats de deux essais de pompage, le projet de Lavey consiste à exploiter la plus importante ressource géothermique découvert en Suisse à ce jour (1200 L/min à 70 °C). L'énergie géothermique prélevée permet une substitution de l'énergie fossile anciennement consommée par le centre médico-thermal pour le chauffage de locaux, d'eau sanitaire de douche et de bains (optimisation de la cascade énergétique sans pompe à chaleur). Les installations requises ont été effectuées par le canton de Vaud qui fournit la chaleur au propriétaire. Les équipements à l'intérieur du bâtiment ont été réalisés par le propriétaire du bâtiment.

Wärmegewinnung aus Thermalwasser, Schinznach Bad [27]: Die Bad Schinznach AG hat in den letzten Jahren grosse Investitionen für ein attraktives und zeitgemässes Bäderangebot vorgenommen. Zur Sicherung des qualitativ hohen Wertes des Kurgebietes war es daher naheliegend, dass man die Thermalwasservorkommen vor Ort besser nutzen sollte. Für diese Nutzung wurde nun zusätzlich in eine Wärmepumpe und

eine Badwasser-Direktnutzung investiert. Diese Ergänzung der bestehenden Heizsysteme wird mit Thermalwasser (Temperatur ca. 44 °C) betrieben um Schadstoffemissionen von fossilen Brennstoffen möglichst zu minimieren. Das Ziel der Anlage ist es, einen besseren, naturnahen Kurbetrieb durch nachhaltige Nutzung des Thermalwassers für den Badebetrieb bzw. eine Wärmeerzeugung mit Wärmepumpe zu gewährleisten. Um dies zu erreichen, wird in der Direktnutzung nicht benötigtes Wasser wieder in den Aquifer rückgeführt. Diese Massnahmen sollen längerfristig zur Substitution des bisherigen Erdölverbrauches von ca. 500 Tonnen Öl pro Jahr führen. Dabei wird zu beachten sein, dass die konzessionierte Wassermenge von 500 L/min eingehalten wird. Endgültige Messergebnisse liegen noch keine vor.

Wärmenutzung aus dem Ricketunnel, [28]: Der Bahntunnel durch den **Ricken** verbindet mit einer Länge von 8,6 km die Linie *St. Gallen • Rapperswil*. Am Dorfrand von *Kaltbrunn* befindet sich sein Südportal, aus welchem pro Minute 690 Liter Wasser mit einer Temperatur von 12,3 °C fließen. In *Kaltbrunn* wird in einer ersten Ausbautappe die Beheizung der Mehrzweckhalle, einer Zivilschutzanlage und eines Kindergartens ermöglicht. Damit wird aber erst ein Drittel des vorhandenen Potenzials ausgeschöpft. Die Wärmeerzeugung erfolgt mit einer vierstufigen Wärmepumpe, welche eine installierte Leistung von 156 kWh Heizwärme pro Jahr erzeugt. Die benötigte Antriebsenergie für die Wärmepumpe beträgt ca. 75'000 kWh pro Jahr. Der entsprechende Substitutionseffekt von rund 27'000 Litern Heizöl pro Jahr reduziert die CO₂-Emissionen und die damit verbundene Umweltbelastung.

Wärmenutzung aus dem Umfahrungstunnel Mappo- Morettina [29]: Nell'ambito di uno studio commissionato dall'Ufficio Federale dell'Energia per l'utilizzazione a scopo termico dell'acqua proveniente dalle Gallerie *Mappo-Morettina*, il Municipio di *Minusio* ha accolto favorevolmente la proposta, decidendo di installare un impianto con pompa calore ad uso riscaldamento e produzione acqua calda di consumo. L'installazione eseguita copre il fabbisogno calorico e termico per l'acqua calda dell'edificio di servizio presso il nuovo Centro Sportivo e ricreativo di *Mappo*, ubicato nell'immediata vicinanza del portale Nord-Est della galleria *Mappo-Morettina*. Esso è pure dimensionato per l'eventuale riscaldamento d'un futuro edificio ad uso

ristorante. Durante gli anni 2000 e 2001 è stato raggiunto un rendimento (JAZ) di circa 4.

Gewinnung geothermischer Energie aus dem Hauenstein Basistunnel [30]. Der *Wärmeverbund WVR Rankwog* wurde im Jahr 1999 erstellt und ab Herbst 1999 in Betrieb genommen. Die Anlage beliefert in einer ersten Phase 3 Liegenschaften in *Trimbach* mit Wärmeenergie. Betreiber der Anlage ist *die Elektra Baselland* zusammen mit dem lokalen Energieversorger, der *Atel Versorgung AG*. Der Wärmeverbund nutzt die geothermische Wärme aus dem *Hauensteintunnel* mit einer Wärmepumpe. Die Wärmeengewinnung erfolgt durch eine direkte Wasserentnahme aus dem Ablaufkanal des Hauensteintunnels. Die Wärmepumpe ist mit einem Zwischenkreis angeschlossen. Das abgekühlte Wasser wird wieder in den Auslaufkanal zurückgeleitet. Die Wärmeerzeugung ist für einen ganzjährigen bivalenten Anlagebetrieb ausgelegt. Als Ergänzung zur Wärmepumpe stehen zwei Ölkessel mit 130 kW und 800 kW Leistung zur Verfügung. Der Wärmeverbund beliefert drei Objekte mit Wärmeenergie für Heizzwecke und Brauchwarmwasseraufbereitung (insgesamt 1 MW Anschlussleistung). Der Endausbau ist für eine Anschlussleistung von rund 1,3 MW vorgesehen.

Im ersten Betriebsjahr lag der Energieanteil der Wärmepumpe mit gesamthaft 41% unter den Erwartungen. Gründe dafür sind:

- Die Verschmutzungsproblematik des Tunnelabwassers und Reinigung des Wasserkanals im Tunnel durch die SBB hatte längere Stillstände der Wärmepumpe zur Folge, was häufige Einsätze des Betriebspersonals erforderte;
- ein in den ersten Monaten nicht optimierter Betrieb bzw. Anlagenstillstände während der Inbetriebnahmephase;
- fehlende Niedertemperaturbezüger, d.h. der Endausbau des Wärmeverbundes ist noch nicht erreicht.

Die Leistungswerte der Wärmepumpe liegen jedoch mit einer Jahresarbeitszahl von 4,0 über den Erwartungen, dies dank hohen Quellentemperaturen (16 • 22 °C). Der Energieanteil der Wärmepumpe von insgesamt 886 MWh führte zu einer Heizölsubstitution von rund 85 TOE (Ton Oil Equivalent).

Géothermie du Gd St Bernard [31]: Le Tunnel du Grand-Saint-Bernard à été construit en 1964 afin de favoriser le transit des marchandises et

des personnes à travers les Alpes. Son entrée nord se trouve à une altitude de 1'850 m, la température minimale selon SIA 384/2 est de $\bullet 20^{\circ}\text{C}$, la température minimale moyenne mesurée durant un mois est de $\bullet 4^{\circ}\text{C}$. Un nouveau bâtiment administratif a été construit afin d'abriter les nouveaux systèmes de contrôle du trafic, ainsi que les zones dédiées à la gestion et aux installations de sécurité. Le bâtiment se compose de trois niveaux, formant une surface brute de plancher de 748 m^2 . Les besoins en énergie chaleur à l'intérieur du bâtiment sont répartis de la manière suivante:

- Chauffage statique des locaux: 22,50 kW
- Chauffage par ventilation et chauffage à air: 13,30 kW
- **Puissance totale installée: 38.50 kW**
- Puissance spécifique 38,5 kW; 748 m^2 : $7,9\text{ W/m}^2$

L'installation de production de chaleur totale est en service depuis 1999. Elle a fonctionné à la satisfaction du service d'exploitation du tunnel depuis la mise en service. Dans un souci d'économie de maintenance, une solution est actuellement à l'étude afin de remplacer les filtres synthétiques du monobloc d'évaporation par des filtres métalliques régénérables, compte tenu de l'encrassement plus rapide que prévu, dû essentiellement à l'augmentation du trafic dans le tunnel. La performance (COP) mesurée du système est, en moyenne annuelle, proche de 3,5. Elle

excède des prévisions faites en phase d'avant projet.

Messprogramm eines grossen EWS-Feldes an wärmeisolierten und nicht isolierten EWS, inklusive Durchführung von Thermal Response Tests und Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen an Bohr- Cuttings [32]: In Aarau werden ein Bürogebäude und zwei Punkthäuser neu erstellt. Diese Anlage wird bivalent betrieben (Gaskessel plus Erdwärme aus insgesamt 16 Erdwärmesonden, welche in zwei Reihen bis auf 150 m Tiefe zu liegen kommen). Vorausgesetzt, dass jährlich nur an ein paar Tagen Temperaturen von -8°C auftreten, wird die Wärmepumpe ca. 91% des effektiven Wärmebedarfes abdecken können. Es wird von einer JAZ der WP von 4,64 ausgegangen. Im Winter wird dem Erdreich Wärme entzogen bzw. im Sommer Gebäudeabwärme in das Erdreich zurückgeführt (*Free Cooling*). Die eine Reihe Erdwärmesonden wird dabei in den obersten 8 m isoliert (Ausschluss des Einflusses der *neutralen Zone*), die andere Reihe nicht. Zur Ermittlung des effektiven Wärmezuflusses ist gemäss Lithologie beabsichtigt, an 8 Proben Wärmeleitfähigkeitsmessungen zu machen. Zusätzlich wird zur Optimierung des Systems ein thermischer Responsetest durchgeführt. Am Ende der zweijährigen Messperiode sollen Wärmebilanzen erstellt werden. Zusätzlich soll der Kosten-/Nutzen-Effekt der Wärmeisolierung der obersten Schichten eruiert werden. Mit den Projektarbeiten wurde begonnen.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Forschung:

Als grosser Fortschritt in der DHM- Forschung sind die Resultate der in 2001 nun erfolgreich durchgeführten geothermischen Tiefbohrung Otterbach 2 in Basel zu betrachten.

Dank der Funktion von Herrn Prof. *L. Rybach* als *Chairman des Geothermal Implementing Agreement Executive Committee*, konnte das DHM- Projekt in Basel mit wichtigem Know-how von ähnlichen Hot- Dry- Rock Projekten aus dem Ausland versorgt werden. In 2002 gilt es nun Finanzquellen für das Abteufen einer tiefen Produktionsbohrung (ca. 5'000 m) zu finden.

Basierend auf den ermutigenden Ergebnissen aus den beiden *AlpTransit* Projekten, stehen Beratungs- und Informationsarbeiten für die vier

betroffenen Kantone im Zentrum der kommenden Aktivitäten. Diese Kantone bzw. einzelne Gemeinden haben bereits grosses Interesse an der Nutzung von warmen Tunnelwässern bekundet. Ein weiterer, sehr wichtiger Aspekt ist die Identifikation von zukünftigen Nutzungsmöglichkeiten von den warmen Drainagewässern aus den Tunnelröhren.

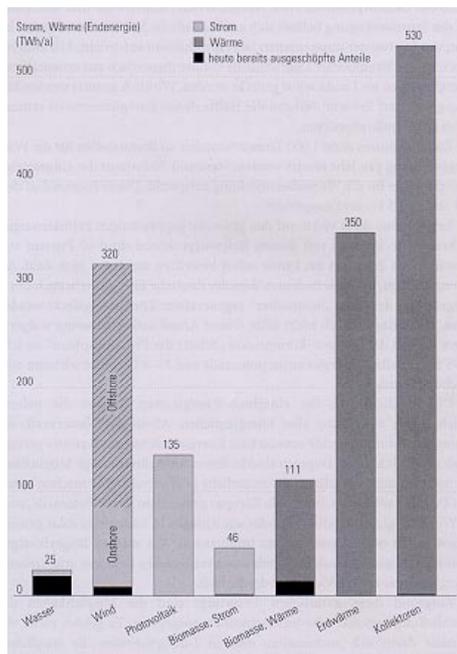
Die Forschungsziele in der untiefen Geothermie (EWS, Geostrukturen, geothermischer response test, etc.) konnten voll erreicht werden, und werden weiterverfolgt.

P+D Projekte:

Im Gegensatz zu der bereits bestens etablierten EWS-Wärmenutzung für Ein- und Mehrfamilienhäuser, befindet sich Nutzung der Erdwärme-

und Kälte für Grossanlagen noch im Frühstadium (vergleichbar mit der EWS-Anwendung vor ca. 15 • 20 Jahren). Erste Erfahrungen zeigen aber heute schon in eine vielversprechende Zukunft.

Bei der Beheizung von eher kleinen Baueinheiten steht sicherlich der Verkauf einer WP im Zentrum des Marketings (vorwiegend durch die Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz); bei grösseren Anlagen ist aber eindeutig die Anwendung von Erdwärme und -Kälte das Verkaufsargument der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie.



Figur 5: Potential der einzelnen erneuerbaren Energiequellen in Deutschland (Quelle: [35])

Der Nutzung von Erdwärme werden im benachbarten Deutschland sehr grosse Potentiale zugesprochen (siehe Figur 5). Um die Verwendung von Geothermie in unserem Land besser auf dem Markt zu platzieren, bedarf es einer grösseren Anzahl von Vorzeige-Projekten, die erwiesenermassen gut funktionieren. Aus diesem Grund wurden an mehreren Grossprojekten mindestens zweijährige Messkampagnen zu Erfolgskontrolle durchgeführt bzw. finanziell unterstützt. Nur der effektive Nachweis des technisch-wirtschaftlichen Erfolges eines Projektes kann Planer, Bauherrn oder kantonale Entscheidungsträger zur vermehrten Anwendung von verschiedenen geothermischen Nutzungstechnologien motivieren und zur Nachahmung stimulieren. Das gilt natürlich auch für Heat-Contracting bei geothermischen Heizanlagen.

Die bisher gewonnenen Messergebnisse sollen in der Fachpresse publiziert bzw. technische Beschreibungen von erfolgreichen Einzelprojekten in allen drei Landessprachen gedruckt werden.

Aus den genannten Gründen werden Erfolgskontrollen an den meisten P+D-Projekten auch im Jahr 2002 weitergeführt.

Für das Jahr 2002 ist das Update der bis 2000 bereits bestehenden geothermischen Statistik fest eingeplant. Daher sind im vorliegenden Bericht noch relativ wenige Daten über geothermische Leistungen oder geothermisch produzierte Energiemengen aufgeführt.

Von eigentlichen Misserfolgen kann nicht berichtet werden, obschon bei einigen Projekten – aus unterschiedlichen Gründen – gewisse Verzögerungen bei Projektabschlüssen aufgetreten sind.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

- [1] M.O. Häring, (haering@geothermal.ch), ARBEITSGEMEINSCHAFT DHM, Basel: **Deep Heat Mining; Entwicklung der Hot-Dry-Rock/Hot-Wet-Rock Technologie in der Schweiz; 2001** (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 2001)** (JB)
- [3] M.O. Häring, (haering@geothermal.ch), GEOTHERMAL EXPLORERS LTD., Basel: **Technischer Bericht, Geothermie-Sondierbohrung Otterbach 2, Basel** (SB) ENET: 210139

- [4] J. Wilhelm, (jules.wilhelm@bluewin.ch), INGENIEUR-CONSEIL, Pully: **Potentiel géothermique et possibilités d'utilisation des eaux des tunnels de base d'Alptransit. Etat des investigations** (SB) ENET: 210131
- [5] G. Oppermann (gerhard.oppermann@gruneko.ch) GRUNEKO AG, Basel: **Statusbericht Wärmenutzung warmer Tunnelwässer aus dem St. Gotthard und Lötschberg-Basistunnel**. Projekt ist angelaufen.
- [6] E. Rohner, (engeo@engeo.ch), GRUNDAG AG, Gossau: **Lebensdauer von EWS in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung** (SB) ENET: 210140
- [7] W.J. Eugster (wjeugster@swissonline.ch), POLYDYNAMICS ENGINEERING, Zürich: **Langzeitverhalten der Erdwärmesondenanlage Elgg** (SB) ENET: 210126
- [8] W.J. Eugster (wjeugster@swissonline.ch), POLYDYNAMICS ENGINEERING, Zürich: **Tiefe Erdwärmesonde Weggis – Messkampagne zur Dokumentation der neuen Einflüsse beim Ausbau der Abnehmerleistung** (SB) ENET: 210115
- [9] D. Pahud, (daniel.pahud@dct.supsi.ch), LEE – SUPSI, Canobbio: **Long Term Influence of Multiple Heat Extraction Bore Holes** (JB)
- [10] M. Thüring (thuering@ist.supsi.ch), ISTITUTO SCIENZE DELLA TERRA – SUPSI, Cadenazzo: **Geothermische Karte Tessin. Wärme aus Boden und Wasser – Kanton Tessin** (JB)
- [11] L. Laloui (lyesse.laloui@epfl.ch), LMS, EPF-Lausanne: **Finalisation du module de l'EPFL pour les tests de réponse**. Projekt angelaufen.

Liste der P+D-Projekte

- [12] Ch. Kapp, (ch.kapp@nek.ch), NEK UMWELTTECHNIK AG, Zürich: **Demonstrationsprojekt zum Effizienzvergleich zwischen konventioneller (tiefer) EWS und der Neuentwicklung einer Regenschirm-Erdwärmesonde** (JB)
- [13] D. Pahud, (daniel.pahud@dct.supsi.ch), LEE – SUPSI, Canobbio: **Mesure des performances thermiques d'une pompe à chaleur sur sondes géothermiques avec recharge partielle à Lugano (TI)**: Anlage erstellt, die vertraglichen Messungen laufen wie geplant.
- [14] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, Aarau: **Wirtschaftlichkeitsermittlung einer Sondenisolation im obersten Abschnitt einer EWS-Anlage in Otelfingen (ZH)** (JB)
- [15] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, Aarau: **WP – Anlage Chestonag Automation AG, Seengen (AG)** (JB)
- [16] 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 Vers-l'Eglise / Fully** (JB)
- [17] D. Pahud, (daniel.pahud@dct.supsi.ch), LEE – SUPSI, Canobbio: **Dock Midfield de l'aéroport de Zürich: mesure et optimisation des performances thermiques du système avec pieux échangeurs** (JB)
- [18] Ch. Kapp, (ch.kapp@nek.ch), NEK UMWELTTECHNIK AG, Zürich: **Regionalgefängnis Rheintal, Altstätten (SG): Beheizung und Klimatisierung mittels Energiepfählen, gekoppelt mit Erdwärmesonden (Erfolgskontrolle)**. Die Inbetriebnahme des Gebäudes ist für das Jahr 2002 vorgesehen.
- [19] Ch. Kapp, (ch.kapp@nek.ch), NEK UMWELTTECHNIK AG, Zürich: **Demonstrationsprojekt zur Energieeffizienz einer grossen Wohnüberbauung Unteres Hompeli, SG im Minerogie-Standard, deren Wärmebedarf monovalent durch ein Feld tiefer Erdwärmesonden abgedeckt wird**. Projekt ist angelaufen.

- [20] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, Aarau: **Zweijährige Erfolgskontrolle (Messcampagne) der GW-WP Anlage Pfarrhaus Bremgarten**. Projekt ist angelaufen.
- [21] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, Aarau: **Zweijährige Erfolgskontrolle (Messcampagne) der GW-WP Anlage Wohnsiedlung Winkel in Remigen (AG)**. Projekt ist angelaufen.
- [22] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, Aarau: **Zweijährige Erfolgskontrolle (Messcampagne) der GW-WP Anlage Feuerwehrmagazin und Wohnungen Sisseln, AG**, Projekt ist angelaufen.
- [23] Ch. H. Häring, (info@haring.ch), HÄRING AG, INNOVATIVE BAUSYSTEME, Pratteln: **Geothermie Contracting Solar One, Itingen, BL** (SB) ENET: 210183
- [24] W. Tschuck, (w.tschuck@bluewin.ch), HEIZUNGSPLANUNG + ENERGIEBERATUNG, Bottighofen: **Geothermische Wärmepumpe, Schulhaus Egelsee, Kreuzlingen** (SB) ENET: 210152
- [25] G. Bianchetti, (gbianc@vtx.ch), HYDROGEOLOGIE, GEOTHERMIE, GEOTECHNIQUE, Sion: **Exploitation du forage géothermique JAFE de Saillon** (JB)
- [26] G. Bianchetti, (gbianc@vtx.ch), HYDROGEOLOGIE, GEOTHERMIE, GEOTECHNIQUE, Sion: **Exploitation du nouveau forage géothermique P600 de Lavey-les Bains** (JB)
- [27] S. Flury, (ing.buero@sytek.ch), SYTEK AG, INGENIEURBÜRO FÜR GEBÄUDETECHNIK, Binnigen: **Wärmegewinnung aus Thermalwasser (Schinznach Bad)** (JB)
- [28] R. Cotting, (cotting-ag@bluewin.ch), COTTING INGENIEURBÜRO AG, Uznach: **Wärmenutzung aus dem Rickentunnel** (JB)
- [29] A. Gobbi, (ing.de-carliu@bluewin.ch), STUDIO MARCO DI CARLI, Locarno: **Tunnelwassernutzung Mappo-Moretina** (SB) ENET: 210138
- [30] D. Zürcher, (daniel.zuercher@durena.ch), DURENA AG, Lenzburg: **Gewinnung geothermischer Energie aus dem Hauenstein Basistunnel** (JB)
- [31] Ch. Meldem, (contact@meldemenergie.ch), MELDEM ENERGIE SA, Lausanne: **Géothermie Gd-St-Bernard** (SB) ENET: 210151
- [32] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, Aarau: **Messprogramm eines grossen EWS-Feldes an wärmeisolierten und nicht isolierten EWS, inklusive Durchführung von Thermal Respose Tests und Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen an Bohr-Cuttings**. Projektbeginn ist Januar 2002.

Referenzen

- [33] Verein Deutscher Ingenieure: **Thermische Nutzung des Untergrundes, VDI 4640**. VDI-Gesellschaft Energietechnik, Postfach 10 11 39, D- 40002 Düsseldorf, 1998
- [34] M. Brunner, Dr. H.L. Gorhan et al. (Autorenkollektiv): **Geothermie, praktische Nutzung von Erdwärme**. Bundesamt für Energie, 1998.
- [35] M. Fishedick und J. Nitsch: **Nach dem Ausstieg. Zukunftskurs Erneuerbare Energien**. S. Hirzel Verlag Stuttgart, Leipzig 2000, S 41 • 46.
- [36] A. Busslinger: **Geothermische Prognosen für tiefliegende Tunnel**. Diss. ETH Nr. 12715, 1998, S 14 • 170.

PROGRAMM WIND

Überblicksbericht zum P+D-Programm 2001

Robert Horbaty

robert.horbaty@enco-gmbh.ch



750-kW-Windkraftanlagengenerator auf dem Prüfstand der Fa. Bartholdi in Koblenz, AG

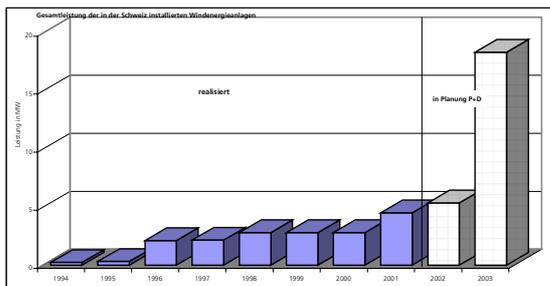
Das EW-Urseren errichtet eine 750-kW-Anlage auf dem Gütsch (2'300 m.ü.M.) bei Andermatt. Diese neuartige Windturbine enthält wesentliche Komponenten aus schweizerischer Produktion, u.a. diesen Generator mit variablen Drehzahlen und Permanentmagnet-Rotor.
(Foto: ENCO GmbH)

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

VORBEMERKUNGEN

Sämtliche Aktivitäten und Projekte des Programms Windenergie 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.

Das UVEK mit seinen Ämtern BUWAL, BFE und ARE hat eine Medienmitteilung veröffentlicht, welche sich klar positiv zur Nutzung der Windenergie in der Schweiz äussert und in Übereinstimmung mit den Strategien von EnergieSchweiz als Ziel **50 – 100 GWh Windstrom / Jahr bis ins Jahr 2010** definiert (Fig. 1).



Figur 1: Übersicht über realisierte Projekte (blau) und der konkret geplanten Vorhaben (weiss) in der Schweiz

Die 18 in der Schweiz installierten Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von 4,51 MWp erzeugten 2001 3,935 GWh Elektrizität. Die installierte Leistung der Windkraftanlagen in der Schweiz hat im vergangenen Jahr um **rund 60% zugenommen**. Mehr als 95 % der erzeugten Elektrizität wurde im grössten Windpark der Schweiz auf dem Mt-Crosin durch die Fa. Juvent SA generiert.

Der vorliegende Jahresbericht beschränkt sich auf die reinen P+D-Aktivitäten, die Berichterstattung zu den marktorientierten Aktivitäten von Suisse Eole, der schweizerischen Windenergievereinigung, finden sich im entsprechenden Jahresbericht [16].

Stellenwert der Windenergie

Weltweit war Ende Juni 2001 eine Windkraftleistung von knapp 20'000 Megawatt peak

installiert, davon 15'000 MWp in Europa. Zu den führenden Ländern gehört auch Deutschland, wo Ende 2001 rund 8'750 MWp installiert waren. Mit dieser installierten Leistung lassen sich in einem normalen Windjahr knapp **3,5 Prozent des deutschen Stromverbrauchs** decken [17]. Insgesamt dürfte sich die weltweit installierte Windkraft-Leistung im Jahr 2001 um über 5'000 MWp erhöht haben. Neue Studien gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2010 eine Windkraftleistung von rund 60'000 MWp in Europa installiert sein wird.

Windenergie- Markt Schweiz

Gemäss einer im Auftrag des BFE durchgeführten Studie sind auch in der Schweiz Standorte für Windkraftanlagen vorhanden, um langfristig rund 3-5% des Strombedarfes decken zu können. Die spezifischen Kosten von grösseren Windkraftanlagen betragen **ca. 2'000 Fr. / kWp** wodurch auch in der Schweiz an gut bewindeten Standorten **Stromgestehungskosten von unter 20 Rp. / kWh** resultieren. Windstrom fällt vor allem in Wintermonaten (ca. 60 • 70%) bei grosser Nachfrage an. Dadurch bietet die Windenergie gute Chancen für eine dezentrale Energieproduktion in Randregionen mit zunehmender Bedeutung im liberalisierten Strommarkt – **Ökostrom als Nischenprodukt!**

Sowohl Off-Shore Anlagen als auch Anlagen im Gebirge müssen aufgrund der eingeschränkten Zufahrtsmöglichkeiten und den harschen klimatischen Bedingungen eine sehr **hohe Verfügbarkeit** aufweisen. Dies eröffnet **Marktchancen** für die teure aber qualitativ hoch stehende schweizerische Elektro- und Messapparatebranche. Die Windenergie entwickelt sich heute in einem Bereich, welcher als Kerngeschäft der schweizerischen Elektro- und Maschinenindustrie bezeichnet werden muss. Aber auch Finanzierungs- und Versicherungsinstitute aus der Schweiz sind heute weltweit im Bereich Windenergie engagiert. Ein **substantieller Heimmarkt** ist eine Garantie für den Erfolg von schweizerischen Firmen auf dem Weltmarkt.

SCHWERPUNKTE GEMÄSS ENERGIEFORSCHUNGSKONZEPT 2000 • 2003

Im Energieforschungskonzept 2000 – 2003 [18] sind folgende Schwerpunkte der Forschung und Umsetzung aufgeführt:

- **Standortabklärungen** und Projektentwicklungen im gebirgigen Terrain unter klimatisch schwierigen Voraussetzungen (Modellierungen, Messdatenerfassung unter vereisenden Bedingungen)
- **Förderung** von Einzelprojekten für Nischenprodukte wie eisfreie Anemometer, optimierte Leistungselektronik u.a.
- Klärungen von windenergiespezifischen **Akzeptanzproblemen**.

Die Aktivitäten des Programms konzentrierten sich im Jahr 2001 auf die Erarbeitung von Planungshilfen, auf die Unterstützung von Standortabklärungen sowie die Installation und Evaluation von Pilot- und Demonstrationsanlagen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

PLANUNGSHILFEN

Die Entwicklung von Windenergieprojekten ist in der Schweiz nach wie vor mit Unsicherheiten und planerischen Risiken verbunden. Das Programm Wind hat denn auch eine Vielzahl von Unterlagen, Studien und Planungshilfen erarbeitet, um entsprechende Projekte mit einer hohen Erfolgchance realisieren zu können. Die im Dezember 1996 veröffentlichte Studie **Windkraft und Landschaftsschutz** [19] quantifiziert das technisch mögliche Windenergiepotential in der Schweiz (3 – 5% des damaligen Stromverbrauchs der Schweiz) unter Berücksichtigung der Aspekte des Landschaftsschutzes und stellt mögliche Standorte kartografisch dar. Der Leitfaden **Planung von Windenergieanlagen** [20] aus dem Jahre 1999 informiert umfassend über die verschiedenen Aspekte eines Windenergieprojektes unter Berücksichtigung der spezifisch schweizerischen Rahmenbedingungen. Basierend auf diesen Publikationen wurden 2001 weitere Instrumente entwickelt:

Windenergie und Raumplanung [1]: Um das Planungsverfahren in allen Kantonen mit relevantem Windenergiepotential zu standardisieren, wurde eine ausführliche Checkliste Windenergie und Raumplanung erarbeitet. In der Begleitgruppe zu diesem Projekt haben das BUWAL, das ARE und die Stiftung für Landschaftsschutz Einsitz genommen. Über eine ausführliche Vernehmlassung bei den zuständigen Stellen wurde auch die Sicht der Kantone integriert.

Im Flachland bewährte Computermodelle sind für komplexes, gebirgiges Gelände oft ungeeignet, weil die im flachen Gelände erlaubten physikalischen Vereinfachungen im komplexen Gelände nicht zulässig sind. Im Gebirge sind deshalb alternative Methoden erforderlich, um zuverlässige Windgutachten für Windkraftanlagen zu erstellen. **Die V3-Toolbox** [2a] erläutert das allgemeine Vorgehen zur Erstellung von Wind-

gutachten. In einem **Flussdiagramm** werden die Entscheidungen, die für ein Windgutachten zu fällen sind und die Teilschritte, die zu bearbeiten sind, dargestellt. Entscheidungsgrundlagen und Tools werden detailliert erläutert. Insbesondere wird die breite Auswahl der heute erhältlichen **Computermodelle für Windgutachten** präsentiert.

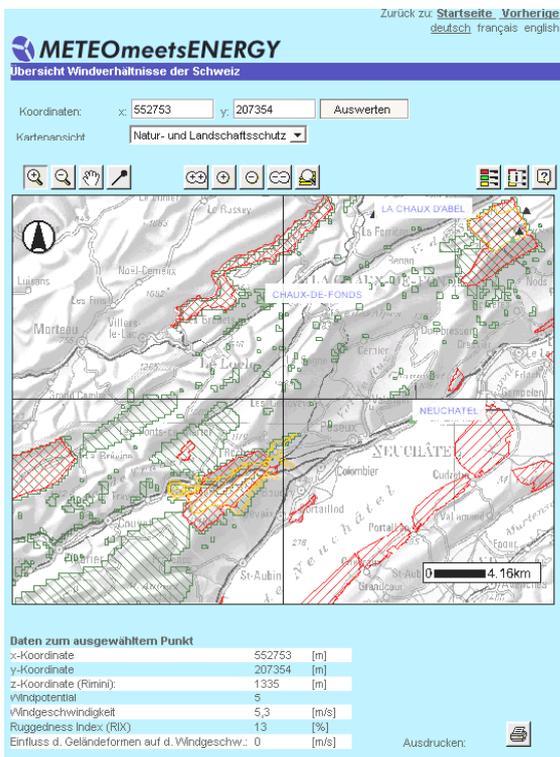
FACTS [2b]: Das V3-Toolbox **Software-Programm** wurde im Zusammenhang mit dem Pilotprojekt Gütsch validiert. Die Entwicklung der Methode und die Durchführung der Rechnungen erfolgte in enger Kooperation mit dem **nationalen Rechenzentrum CSCS** und der **ETH-Zürich**. Das Verfahren kann für jedes Gelände durchgeführt werden insbesondere für extrem schwierige topographische und meteorologische Verhältnisse.

Winddatenbank auf dem Internet [2c]: Folgende umfassenden Informationen sind unter dem Titel *Windkarten Schweiz* auf der Website von Suisse Eole [19] erhältlich (Beispiel. s. Fig. 2)

- [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](#) 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

nen Häufigkeitsverteilung. Format Microsoft Excel 97.

- **Detailierte Darstellung** der für Windenergie-Nutzung relevanten geographischen Aspekte, inkl. Landschaftsschutzgebiete



Figur 2: Auf der aktualisierten Windenergiedatenbank <http://stratus.meteotest.ch/mme/> sind u.a. auch Natur- und Landschaftsschutzgebiete dargestellt.

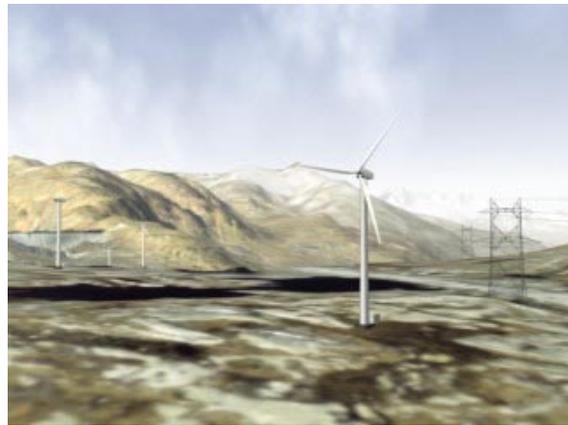
EXCEL-Tool für Wirtschaftlichkeitsberechnungen [3a]: Mit diesem Instrument lassen sich die Elektrizitätsgestehungskosten von Windkraftanlagen berechnen, optimieren und mit denjenigen einer neuen konventionellen Anlage (Netz) vergleichen. Es können 3 Varianten berechnet werden. Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen erfolgen gemäss **Annuitätenmethode**. Durch den checklistenartigen Aufbau der Investitionskostenerfassung soll verhindert werden, dass Kostenpositionen vergessen gehen. Es kann unter [19] heruntergeladen werden.

STANDORTABKLÄRUNGEN

Das Programm *Wind* unterstützt Standortabklärungen zur Installation von Windkraftanlagen. Mit diesen Studien wird die **Machbarkeit von Windkraftprojekten** fundiert abgeklärt. Die Kriterien beinhalten:

- Erschliessung (Elektrizität, Zuwegung)

- Windressourcen (Windmessungen, Hochrechnungen auf langjährige Verhältnisse)
- Umweltverträglichkeit
- Wirtschaftlichkeit (möglicher Energieertrag und Finanzierung)



Figur 3: Fotomontage des Projektes auf dem Gott-hard – als Basis einer Internet-Umfrage zur Akzeptanz von Windkraftanlagen

Generell kann davon ausgegangen werden, dass die mittleren Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe (50 m) für moderne Windkraftanlagen **gut geeignet sind** (im Jura > 6 m/s), dass aber die raumplanerischen Abklärungen zunehmend eine grosse Bedeutung bekommen. Es zeigt sich bei den laufenden Bauprojekten deutlich, dass bei der Dimension der heutigen Anlagen (60 m Masten, 60 m Rotordurchmesser) das **Planungsverfahren** (Richtplanung, Nutzungsplanung) bzw. mögliche Einsprachen gegen die Projekte der bremsende Faktor sein wird.



Figur 4: Errichtung eines 50 m Messmasten am zukünftigen Standort einer Windkraftanlage in St. Moritz. (Foto: ABB Energie Services Schweiz)

Das BFE unterstützte im Jahr 2001 Standortabklärungen an 10 Standorten: **Mettlimoos-Obwyden** [4], **Windpark Sainte-Croix** [5],

Aroser Weisshorn [6], **Grimselfpass** [7a], **Gottardpass** [7b] (Fig. 3), **Igelrain** [8], **Linthebene** [9], **St. Moritz** [10] (Fig. 4), **Saint-Brais** [11], **La**

Racine [12] und Machbarkeitsstudien laufen für **drei Windenergie-Standorte in Laax** [3a] und für den **Kanton Graubünden** [13a].

Nationale Zusammenarbeit

Die schweizerische Windenergievereinigung **Suisse Eole** bearbeitet alle marktrelevanten Aktivitäten zur Förderung der Windenergienutzung in der Schweiz – 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. Neben **Informations- und Kommunikationsaktivitäten** im Rahmen der konkreten Projekte entwickelte Suisse Eole auch Marketingaktivitäten zur Förderung des **Ökostroms / Courant vert.**

Suisse Eole ist auch im Vorstand der **Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz AEE** vertreten und nimmt dort die Angelegenheiten v.a. der nicht gebäudegebundenen

erneuerbaren Energien, wie Wind, Kleinwasserkraftwerke, etc. wahr.

Mit dem Betreiber des grössten Windparks in der Schweiz, der **Juvent SA**, besteht ein reger Erfahrungsaustausch, um die konkreten Betriebserfahrungen mit ihren 6 Anlagen in die zukünftigen Strategien des Windenergieprogramms integrieren zu können.

Der **Verein für umweltgerechte Elektrizität (VUE)** stellt sicher, dass engagierte Stromkunden, welche bereit sind, für ökologischen Strom mehr zu bezahlen, auch die entsprechenden Dienstleistungen erhalten. Mit der Einsitznahme der Programmleitung *Wind* im Vorstand dieser Organisation werden die Interessen der neuen erneuerbaren Energien im Allgemeinen und der Windenergie im Speziellen optimal eingebracht.

Internationale Zusammenarbeit

Als eigentliches **Nachfolgeprojekt** zum EU-JOULE-II-Programm *wind energy production in cold climate* (1996 • 1999) beteiligt sich die Schweiz nun am *IEA-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development, Annex XIX Wind Energy in Cold Climates*. Inhaltlich kann die Schweiz zu folgenden Aktivitäten beitragen:

- **Site assessments:** Auswertung der Erfahrungen mit den bisherigen Standortabklärungen (Ste-Croix, Crêt-Meuron, Grimsel, Gottard) im kalten Klima.
- **Operation and Performance Experiences:** Generelle Auswertung der Betriebserfahrungen an den Standorten mit Windkraftanlagen, Detaillierte Auswertung der Daten mit dem Betrieb der Anlage auf dem Gütsch (800

kW, 2'300 m. ü.M., variable Drehzahl, Blatt- heizung, 20 Jahre Meteodaten 200 m neben Standort)

- **Extraordinary Operational Events:** Der Standort Gütsch ist in jeder Hinsicht als Herausforderung zu bezeichnen

Mit dem Deutschen Windenergie Institut DEWI [21] 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 i. B. (D).

Pilot- und Demonstrationsprojekte



Figur 5: 7-kW-Anlage der Fa. Aventa in Brütten (Foto: ENCO GmbH)

Das BFE unterstützt mit dem Projekt **Standortabklärungen und Messprojekt Leichtwindanlage AVENTA AV-7** [13b] die Evaluation eines Prototyps einer 7-kW-Leichtwindanlage. Aufgrund ihres – im Bezug zur Generatorenleistung – übergrossen Rotors (s. Fig.5) erreicht diese Windturbine bereits bei 6 m/s ihre Nennleistung. Da der ursprünglich vorgesehene Standort in Oberhelfenschwil für die Messdatenerfassung ungeeignet war, führt die AVENTA die Datenerhebung nun an einer weiteren Anlage in Brütten durch. Erste Auswertungen zeigen, dass die **Leistungskennlinie den Erwartungen** entspricht. Über den Energieertrag und die schlussendlich mit dieser Anlage resultierenden Stromgestehungskosten können noch keine Angaben gemacht werden. Dieses Projekt wird von einem **externen Fachplaner** begleitet [14].

850-kW-Windkraftanlage Gütsch [15]: Weltweite Erfahrungen im Betrieb von Windkraftanlagen an **klimatisch schwierigen Standorten** (hohe Turbulenz-Intensität, Vereisung) machen deutlich, dass konventionellen Anlagen Optimierungspotential besitzen. Mit dem vorliegenden, auch vom Kanton Uri unterstützten Projekt werden deshalb folgende Ziele verfolgt:

- Demonstration der Möglichkeiten der **Windenergienutzung an einem Gebirgsstand-**

ort (erste Anlage der 600 • 900-kW-Klasse weltweit in Höhen von über 2'000 m), Betrieb einer grossen Windkraftanlage unter alpinen Bedingungen (Auswirkungen von Kälte, Vereisung und turbulente Winde auf Ertrag)

- Einsatz modernster **Technologie schweizerischer Unternehmen**:
 - getriebeloser Triebstrang mit Permanentmagnet-Generator (Fa. Bartholdi AG in Koblenz AG)
 - Wechselrichter mit hohem Wirkungsgrad (Fa. Technocon in Zürich)
 - Systemlieferung durch ABB Energie Services Schweiz
 - Blattheizung
- Anlagentransport unter anspruchsvollen Bedingungen, weitere Verifizierung des Windenergiepotentials in der Schweiz
- Betriebsoptimierungsphase und **Erfolgskontrolle** (u.a. für Beobachtungen der Klimabeeinflussungen, Verifikation V3-Tool)



Figur 6: Schalung des Mastunterteils der 850-kW-Anlage Gütsch (Foto: Weisskopf Partners GmbH)

Aufgrund von Lieferverzögerungen musste der Montagetermin auf das Frühjahr 2002 verschoben werden. Sämtliche **Vorbereitungsarbeiten** wie Fundament, Stromanschluss, etc. sind jedoch abgeschlossen (s. Fig. 6).

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

POSITIVE ENTWICKLUNGEN

Die Firma Juvent SA hat zwei 850-kW-Vestas-Windturbinen auf dem Montagne du Droit zusätzlich installiert. Dadurch stieg die Stromproduktion aus Windkraftanlagen in der Schweiz im Jahre 2001 um 20% (Inbetriebnahme erst Oktober 2001).

Im Rahmen eines regionalen Richtplanes wurden auf dem Mt-Crosin / Montagne du Droit weitere Windenergie-Gebiete ausgeschieden, was den Bau von drei zusätzlichen 850-kW-Windkraftanlagen ermöglichen wird. Dieser Plan wurde in der Region ohne Einsprachen gutgeheissen.

Die eidgenössischen und kantonalen Behörden genehmigten den Nutzungsplan für den Klein-Windpark *Crêt-Meuron*, dieser wird nun zur öffentlichen Vernehmlassung aufgelegt.

Das Interesse an der Windenergie nimmt generell nach wie vor stark zu. So wurden in der Zeit vom 1.2.2001 – 30.11.2001:

- 416 Medienartikel Artikel mit insgesamt 786 Seiten veröffentlicht,
- die Beratungsdienstleistungen von Suisse Eole rund 180 mal in Anspruch genommen
- die Website von Suisse Eole 25'447 mal besucht, die einzelnen Seiten 264'215 mal angeklickt
- und 4'262 Dokumente heruntergeladen.

Die Zusammenarbeit mit der Elektrizitätsbranche konnte generell vertieft werden, 96 TeilnehmerInnen besuchten die internationale Tagung *Windstrom vom Gebirge* – 25 davon aus der Elektrizitätsbranche.

Die Nationalrat-UREK hat am 9. April 2001 das Windenergieprojekt der Fa. Juvent SA auf dem Mt-Crosin besichtigt und besuchte auch die Firma Bartholdi AG in Koblenz – Herstellerin von Generatoren für Windkraftanlagen.

BREMSENDE ENTWICKLUNGEN

Obwohl Marktrecherchen zeigen, dass in der ganzen Schweiz ein substantieller Markt für Ökostrom vorhanden ist, wird bis heute – mit Ausnahme der Juvent SA und der ADEV Windkraft AG – noch kein Windstrom direkt vermarktet. Unsicherheiten bezüglich der Marktöffnung seitens der EW und die weiterhin unklaren Rücklieferbedingungen für private Produzenten (Refe-

rendum zum EMG) sind die Hauptgründe für diese Situation. Auch entwickeln sich die baureifen Projekt sehr viel langsamer als angenommen. Gründe sind Planungsunsicherheit und teilweise Opposition bei konkreten Projekten.

Aufgrund der zunehmend aggressiver geführte Debatte um die Strommarktöffnung, bzw. um das Elektrizitätsmarktgesetz EMG besteht die Gefahr, dass die Interesse der neuen erneuerbaren Energien in dieser energiepolitischen Ausmarchung *unter die Räder* kommen.

Unter Federführung des bekannten Windenergie-Opponenten Prof. Hans-Christoph Binswanger hat die Schweizerische Stiftung für Landschaftsschutz ein Positionspapier veröffentlicht, welches deutlich hinter die im Jahre 1996 von dieser Organisation gefasste Position zurückfällt. Dies wird die Planung von Windenergieprojekten weiter verzögern.

AUSBLICK

Bis ins Jahr 2010 sollen 50 – 100 GWh / Jahr Elektrizität in der Schweiz mit Windenergieanlagen erzeugt werden, was 10 • 20 % der Ziele von EnergieSchweiz im Bereich der neuen erneuerbaren Energien entspricht.

In einem ersten Entwurf zum Energieforschungskonzept 2004 – 2007 wird festgehalten:

Was will das Programm Wind bewirken:

Mit spezifischen Forschungsschwerpunkten zur Windenergienutzung im hügligen und gebirgigen Terrain wird weiteres Know How erarbeitet, um Schweizer Unternehmen auch im weltweit boomenden Windenergiemarkt Erfolgchancen zu ermöglichen.

Strategien und Forschungsschwerpunkte zur obigen Zielerreichung sind:

- Erhöhung der **Akzeptanz** der Windenergienutzung:
 - fundierte Auswertung des Einflusses von Windkraftanlagen
 - Erarbeitung von begründeten Richtlinien zur Ausgestaltung von Projekten
- **Dezentrale Stromproduktion** in Randregionen:
 - Ökostromstrategien als zusätzliche Ertragsmöglichkeiten von Energieversorgern

- geschickte Beteiligungsmodelle für die lokale Bevölkerung an Projekten
- Windenergie als Ergänzung zur Stromproduktion im Inselbetrieb.
- Aufbau eines **Kompetenzzentrums** *Windenergienutzung im Gebirge*:
 - Entwicklung von Know how zur Projektentwicklung in komplexem Terrain,
 - Entwicklung von angepasster Modellierungssoftware für Site Assessments
 - Betrieb von Test-Anlagen im Gebirge, Auswertung Betriebserfahrungen
- Entwicklung von spezifischen **Anlagekomponenten** und –konzepten
 - für klimatisch raue Bedingungen (Eis, Kälte, Turbulenzen)
 - mit hoher Verfügbarkeit (erschwerete Zufahrt, auch für *Off-shore* !)
 - zur Montage mit schwieriger Erschliessung (Hubschrauber, etc.)

Nationales Konzept Windenergie

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 wünscht sich auch die Windenergiebranche – in **Übereinstimmung mit einem Postulat** aus dem nationalen Parlament - ein auf nationaler Ebene abgestimmtes Konzept:

- Weiterführung des **Mediationsprozesses**:
- räumliche **Konkretisierung** dieser Ziele durch Vertiefungsstudie zu möglichen Standorten, d.h. positive Bestimmung der aus nationaler Sicht interessantesten Gebiete
- **Weiterentwicklung** der GIS (Geographisches Informations-System) – Applikationen:
- Integration der Windenergienutzung und der konkreten Ziele in die **kantonalen Energiekonzepte**, Grundsätze zur Energiepolitik, o.ä. der Standortkantone; räumliche Umsetzung dieser Ziele im Rahmen der Richtplanung.
- Anleitung zur Schaffung der **planerischen Voraussetzung** auf Gemeindeebene

Liste der P+D-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET.

Unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden

- [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) V3 – Toolbox** (SB) ♦ **b) FACTS: Windberechnungen am Beispiel des Gütsch** (SB) ♦ **c) Windkraftanlagen auf dem Internet** (SB)
- [3] Thomas Weisskopf, weisskopf.thomas@bluewin.ch, WEISSKOPF PARTNERS, *Zürich*, **a) EXCEL-Tool für Wirtschaftlichkeitsberechnungen** (SB) ♦ **b) 3 Windenergie-Standorte Laax** (JB)
- [4] Roland Aregger, aregger_feldmoos@freesurf.ch, *Rengg*: **Windverhältnisse Region Mettlimoos-Obwyden** (JB)
- [5] René Vuilleumier, rene.vuilleumier@seven.vd.ch, SEVEN, ETAT DE VAUD, *Lausanne*: **2^e étape du Parc d'éoliennes de Sainte-Croix** (JB)
- [6] Michel Zabelka, mzabelka@access.ch, OEKOPLAN, *Zürich*: **Standortabklärungen Aroser Weisshorn** (JB)
- [7] Ch. Kapp, info@nek.ch NEK UMWELTECHNIK AG, *Zürich*: **a) Potential- und Standortabklärungen für ein Windenergieprojekt auf dem Grimselpass** (JB) ♦ **b) Windenergieprojekt auf dem Gotthardpass** (JB)

- [8] ROLF FUCHSER, *Detlingen: Windmessung Igelrain* (JB)
- [9] Jakob Kubli, jakob.kubli@gl.ch BAUDIREKTION KT. GL, *Glarus: Windmessung in der Linthebene* (JB)
- [10] Daniel Steinemann, daniel.steinemann@ch.abb.com ABB ENERGIE SERVICES SCHWEIZ, Zürich: *Windmessungen DEMO-WKA St. Moritz* (JB)
- [11] Max Schneider, schneider-m@bluewin.ch WINDWATT SA, *Carouge: Mesures et études d'impacts pour éoliennes à Saint-Brais, JU* (JB)
- [12] Eric Nussbaumer, info@adevsolarstrom.ch ADEV, *Liestal: La Racine* (SB)
- [13] Peter Krüsi, aventa@energienetz.ch ARGE AVENTA, *Winterthur. a) Nutzung der Windenergie im Kt. Graubünden ♦ b) Standortabklärungen / Messprojekt Leichtwindanlage AVENTA* (JB)
- [14] Mehmet Hanagasioglu interwind@compuserve.com INTERWIND www.interwind.ch, Zürich: *Begleitung Leichtwindanlage AVENTA* (JB)
- [15] Markus Russi, ew-ursern@bluewin.ch ELEKTRIZITÄTSWERK URSERN, *Andermatt. 850-kW-WKA Gütsch* (JB)

Referenzen

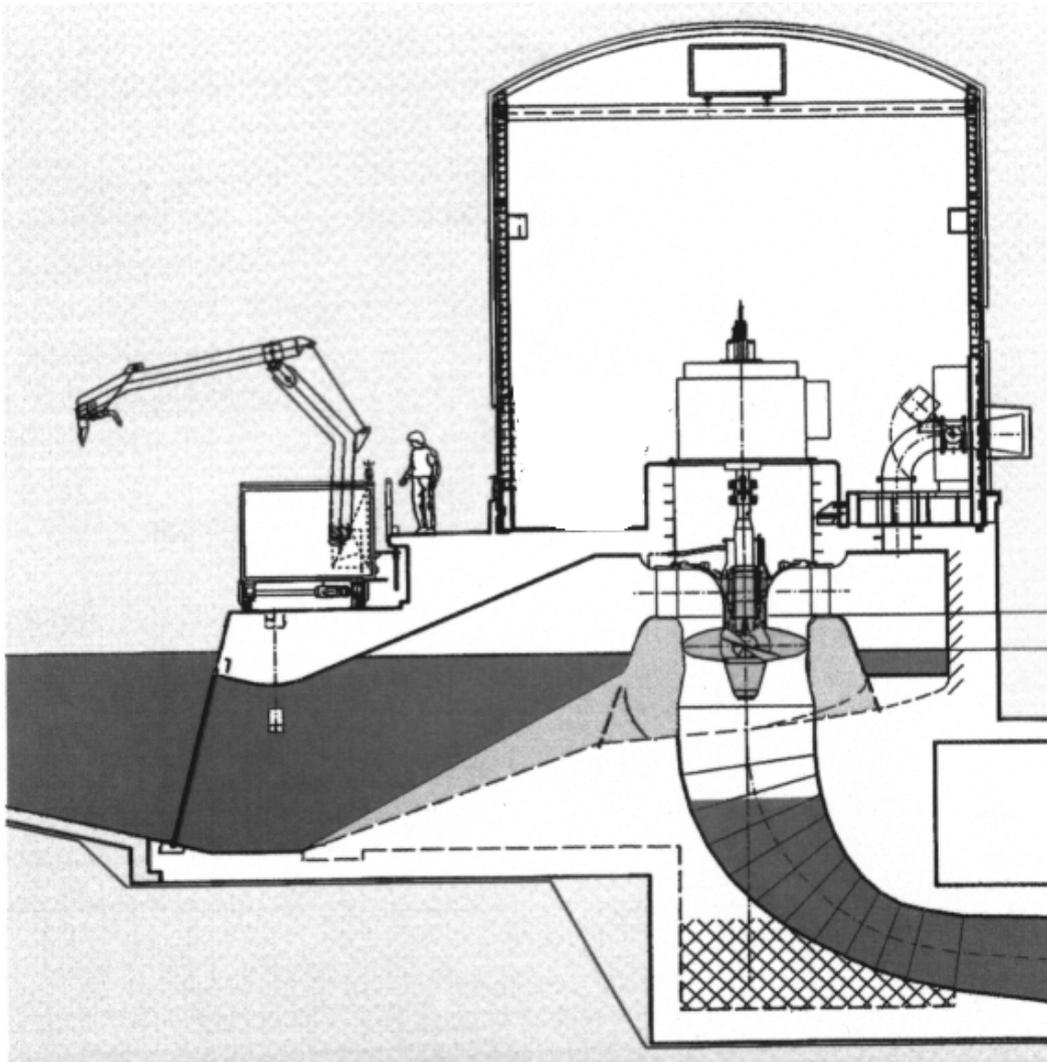
- [16] *Jahresbericht Mandat Windenergie*, Suisse Eole, Dezember 2001, www.suisse-eole.ch
- [17] www.wind-energie.de/aktuelles-und-aktivitaeten/aktuelles.htm
- [18] *Konzept der Energieforschung des Bundes 2000 – 2003*, ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, www.energie-schweiz.ch/bfe/de/forschung
- [19] www.suisse-eole.ch
- [20] H. Buser et al., *Windkraft und Landschaftschutz*, 1996, ENET 197201
- [21] S. Kunz et al., *Planung von Windenergieanlagen*, 1999, ENET 196305
- [22] www.dewi.de

PROGRAMM KLEINWASSERKRAFTWERKE

Überblicksbericht zum P+D-Programm 2001

Hanspeter Leutwiler

pk@iteco.ch



Das Heberprinzip

Der Leitapparat liegt über dem Wasserspiegel (Zeichnung aus ENET News). Die fixen Leit-schaufeln und das Wegfallen der Einlaufschützen bringen Kosteneinsparungen von mehr als 20% - ohne jegliche Kompromisse bei der Jahresproduktion!

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

RAHMENBEDINGUNGEN UND UMFELD:

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen und das Umfeld von Wirtschaft und Gesellschaft der Kleinwasserkraftwerke haben sich in den letzten Jahren markant zu ändern begonnen (vergl. [15]). Hauptursachen sind:

Der Vollzug des revidierten Gewässerschutzgesetzes:

- Höhere Restwassermengen.
- Pflicht für Fischwege, Geschwemmelentsorgung usw.
- Einschränkung von Gewässerverbauungen auch auf den Ausleitkanälen.
- Renaturierungspflichten und strengere Rückbaupflicht am Ende der Konzessionsperiode.
- Massnahmen einzelner Kantone zum Umwandeln von Altreichen (insb. ehehaften Rechten) und zeitlich unbeschränkten Konzessionen in Konzessionen mit Auflagen gemäss heutiger Gesetzgebung.
- Härtere Beurteilungen vom Umweltfragen der Gerichte bei Verwaltungsbeschwerden.

Markttöffnung - mit oder ohne das umstrittene Elektrizitätsmarktgesetz:

- Für unabhängige Kleinproduzenten: Verunsicherung wegen der Infragestellung der gesetzlichen Einspeisevergütungen.
- Für unabhängige Produzenten mit Anlagen über 1 MW: Unklarheiten bei der Berechnung der gesetzlichen Einspeisevergütungen.
- Für öffentliche Verteiler mit Kraftwerken: Risiko eines Preiszerfalls.
- Für alle Kleinwasserkraftwerke: neue Chancen im Direkt- und Indirektverkauf.
- Mit Annahme des Elektrizitätsmarktgesetzes (EMG): **Sehr grosser Marktvorteil** dank Durchleitkostenerlass für Kleinwasserkraftwerke bis 500 kW mittlerer hydraulischer Bruttoleistung.

Die Wasserkraft-Branche fürchtet sich vor der Markttöffnung, investiert nur noch kurzfristig resp. mit Rentabilitätsreserve und versucht die Wasserkraft mit und ohne Umweltzertifizierung in Politik und Markt neu zu positionieren.

Die Markteinführung des Umweltzertifikats (naturemade®) bringt nicht nur Chancen auf höhere Erträge, sondern auch das Risiko einer Zwei-

teilung der Wasserkraft in *umweltfreundlich* und *umweltschädlich*. Dies benachteiligt insbesondere (Kleinst-) Wasserkraftwerke historischen Ursprungs.

Das Programm im Rahmen anderer Förderungen:

Diesen Herausforderungen stehen für die Förderung auf nationaler Ebene den Kleinwasserkraftwerken insgesamt nur rund eine halbe Million Franken öffentlicher und privater Mittel zur Verfügung:

- Direkte Förderung: Beiträge des Bundes an Pilot- und Demonstrationsprojekte sowie an Vorstudien.
- Indirekte Fördermassnahmen des Programms Kleinwasserkraftwerke und diverse Aktivitäten des Interessenverbandes Schweizerischer Kleinkraftwerk-Besitzer (ISKB).

Weitere Möglichkeiten haben die Kantone über die Globalbeiträge (Energiegesetz), einige Elektrizitätswerke über Stromsparmündungen usw. und der im Auslaufen stehende Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL). Bei all diesen Stellen liegen die Schwerpunkte wenig auf der Kleinwasserkraft.

Bundesgesetzlich geniessen die Kleinwasserkraftwerke durch den Wasserzinsersparlass und die Einspeisevergütungen eine *Unterstützung* in der Grössenordnung von jährlich 20 Millionen Franken, welche sich mit der freien Durchleitung (bei Annahme des EMG) verdoppeln kann. Auf die erzeugte Energie umgeschlagen, bewirkt dies eine Unterstützung in der Spanne von rund 1 Rp. (nur Wasserzinsersparlass) bis über 10 Rp. pro Kilowattstunde (Einspeisevergütungen oder Durchleitkostenerlass).

Die erst in den letzten Jahren ins Leben gerufenen Ökostromprodukte mit Strom aus Kleinwasserkraftwerken dürften nach einer groben Schätzung von aktuellem Absatz und Aufpreis einen Mehrertrag von wenigen Millionen Franken pro Jahr bringen. Hier besteht jedoch ein grosses, aber schwierig abzuschätzendes Potenzial.

Aus der Betrachtung dieser Verhältnisse lässt sich schliessen, dass das Programm Kleinwasserkraftwerke nur bei guter Abstimmung seiner Massnahmen Erfolg haben kann, und dass die Priorität (mindestens heute noch) dem Erhalt der gesetzlichen Vorzugsbedingungen gilt.

Erhebungsergebnisse und aktuelle Trends:

Information und Beratung zeigen einerseits eine Zunahme der Probleme mit Bewilligungen und eine Verunsicherung der Akteure im Markt, andererseits eine steigende Zahl von Interessenten für den Einstieg in eine Tätigkeit im Markt der Kleinwasserkraftwerke.

Trendänderungen der Investitionen in Wasserkraftwerke treten einige Jahre später als ihre Ursachen auf. Eine Erhebung [9] zeigte bereits eine **Abnahme der Investitionstätigkeit** bei den Kleinwasserkraftwerken unter 300 kW, die wahrscheinlich auf die politische Diskussion der Marktöffnung zurückzuführen ist. Ein ernst zu nehmendes Signal ist die in den letzten Jahren laufend **gesunkene Vorstudientätigkeit**.

Die genannte Erhebung [9] und eine Studie über den Realisierungsstand der Projekte mit Vorstudienbeiträgen des BFE [10] zeigen auch positive Seiten auf:

- Die Kleinstwasserkraftwerke (Anlagen bis 300 kW) haben in der Periode von Energie 2000 die Kapazität von 56 Jahresgigawattstunden zugebaut, was einem Bruttowachstum von fast 30% entspricht. Nimmt man die Stilllegungen in der selben Periode mit 16 GWh an (offizielle Zahlen sind nicht vorhanden), so resultiert dennoch ein **Nettowachstum von über 20% • das Vierfache des Zieles von Energie 2000!** In den Jahren 2000 und 2001 hat sich der Zuwachs jedoch abgeschwächt.
- Kleinwasserkraftwerke sind ein lohnendes Förderobjekt: Gemäss der Studie [10] sind Fördergelder bei der Unterstützung von Vorstudien gut angelegt.

Potenziale:

Die Potenziale für nahezu umweltneutrale Nebennutzungs-Kraftwerke [11] [12], für Modernisierungen / Erweiterungen und für gewässer-/landschaftsverträgliche Teilnutzungen sind noch beträchtlich. Weil jedoch kostengünstigeren Projekte zuerst realisiert werden, steigen die Erschliessungskosten dieses Restpotenzials laufend. Die Akzeptanz der Erschliessung dieser Potenziale in der Politik, bei Behörden und in der Öffentlichkeit ist sehr gut, was langfristig stabile Förderbedingungen, problemlose Bewilligungsverfahren und gute Chancen auf höhere Erträge im wachsenden Ökostrommarkt bringt. Wenig Chancen haben Neubauten mit Beeinträchtigungen von Gewässern und Landschaftsbild.

Da die Technologie der Wasserkraft weitgehend entwickelt ist und eine innovative europäische und weltweite Anbieterbranche besteht, konzentriert sich der Handlungsbedarf für technische Entwicklungen auf die sich in der Regel unter der Rentabilitätsschwelle befindenden Kleinstanlagen mit niedrigen Nutzgefällen und auf Kompakt-Inselbetriebsanlagen für entlegene Siedlungen. In diesem Bereich gibt es noch ein beträchtliches Innovationspotenzial [13]. Bei den grösseren Anlagen sind eher punktuelle Innovationen zu fördern.

ZIELE DES PROGRAMMES**Indirekte und übergeordnete Ziele**

Vor dem Hintergrund des beschriebenen Umfeldes achtet das Programm Kleinwasserkraftwerke konsequent darauf, dass seine Botschaften und Projekte mithelfen, diese Rahmenbedingungen zu verbessern und Akteure in die Richtung von chancenreichen Projekten zu lenken.

Eine weitere indirekte Zielsetzung ist die Rückenstärkung der Entscheidungsträger und Projektierenden durch EnergieSchweiz. Dies wirkt positiv bei Investitionsentscheidungen von Gemeinden, bei Problemen mit Bewilligungen und bei der Finanzierung.

Die Förderaktivitäten sollen dazu beitragen, dass die jährlichen Zuwachsraten der Energieproduktion aus Kleinwasserkraftwerken nicht weiter sinken, sondern wieder auf das Niveau der Mitte der neunziger Jahre steigen, und dass Stilllegungen und Liquidierungen von Wasserrechten die Ausnahme werden.

Diese indirekten Ziele sind insgesamt wichtiger als die direkten Projektziele. Die Ziele sind nur mittel- bis langfristig zu erreichen und erfordern eine Kontinuität in Politik und Förderung.

Jahresziele des Pilot- und Demonstrationsprogramms 2001

Das Programm Kleinwasserkraftwerke hat in den letzten Jahren neben wenigen grossen Projekten eine Vielzahl von kleinen Projekten gefördert, welche abgeschlossen und der Umsetzung zugeführt werden sollen. Wegen Budgetkürzung sollen neue P+D-Projekte erst für 2003 und später akquiriert werden. Für eine gute Mitteleffizienz sollen zudem wenige grössere Projekte mit Breitenwirkung aktiv akquiriert werden • statt wie bisher auf die vielen kleinen Beitragsgesuche

einzuweisen. Die Ziele und Beurteilungskriterien für Gesuche sind im Merkblatt 4 des Programms [13] formuliert.

Jahresziele des Vorstudienprogramms

Das Programm zur Unterstützung von Vorstudien soll mit den Modifikationen vom Herbst 2000 fortgesetzt werden:

- Neu sind maximale Beitragssätze in Funktion der Kraftwerksgrösse festgelegt.
- Ebenfalls neu ist die Unterstützung von Konzessionsprojekten.

- Bei Budgetknappheit werden die Gesuche nach Unterstützungsbedarf und Realisierungschancen der Anlage beurteilt und ausgewählt.

Jahresziele der indirekten Fördermassnahmen

Der Markt soll mittels geeigneter Marketingaktivitäten stimuliert werden, und die Resultate der Förderung sollen gemessen werden. Diese Fördermassnahmen sind Gegenstand eines separaten Berichtes EnergieSchweiz.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

FÖRDERUNG VON VORSTUDIEN

Die Studie ***Bundesbeiträge an Vorstudien für Kleinwasserkraftwerke; Realisierungsstand der Vorstudienprojekte 1992 bis 2000*** [10] untersuchte alle 73 Projekte, welche in dieser Periode mit Vorstudienbeiträgen unterstützt wurden. Ein gutes Drittel der Projekte haben den Realisierungsentscheid bereits hinter sich, d.h. 22 Kraftwerke sind in Betrieb gesetzt oder in Realisierung. Diese haben eine Kapazität von 26 GWh Jahresproduktion und ein Investitionsvolumen von 42 Millionen Franken ausgelöst.

Der als realisierbar eingestufte Anteil an der untersuchten Kapazität, welcher noch in der Planungsphase steht, bringt mit hoher Wahrscheinlichkeit weitere 24 GWh. Dies wird insgesamt rund 50 GWh Zuwachs ergeben und bedeutet für die Grössenklasse der Kraftwerke bis 1 MW rund 8% mehr Energieproduktion. Dieser Erfolg steht einer Beitragssumme der gesamten Vorstudienförderung von 360'000 Franken gegenüber. Auf 50 Jahren amortisiert (die technische Lebensdauer ist bedeutend länger), ergibt dies 7'000 kWh pro Förderfranken.

Im Berichtsjahr wurde das Programm für Vorstudien mit den genannten Modifikationen fortgesetzt. Das Vorstudienprogramm operiert bewusst mit einer niedrigen Eintretensschwelle und geringen Administrationskosten. Für das Einreichen genügt ein spezielles Gesuchsformular und eine fachgerechte Offerte. Die Beitragssätze sind einheitlich • eine klassifizierende Beurteilung wäre ohnehin nicht möglich, weil manche Projekte noch ungenügend definiert sind (diese Definition ist die Aufgabe der Vorstudie). Bei diesem Vorgehen muss mit einem gewissen

Mitnahmeeffekt gerechnet werden. Die Vorstudien reihen sich nahtlos an die vorhergehenden Hilfen der Information und Beratung mit Grobanalysen ein.

Die Budgetziele konnten allerdings nicht erreicht werden, einerseits wegen des verzögerten Starts bei der Umstellung auf energieSchweiz und andererseits auch wegen des Rückgangs der Vorstudientätigkeit in der Branche. Es wurden 6 Vorstudienprojekte bewilligt. 6 Vorstudienprojekte konnten abgeschlossen werden. alle Vorstudienberichte sind bei ENET unter www.energieforschung.ch erhältlich. Bei ENET liegen heute zwei Dutzend Vorstudienberichte vor, welche unterschiedlichen Projekte beschreiben. Dieses Know-how ist für Projektierende sehr nützlich, insbesondere für Selbstplaner und Selbstbauer.

UMWELTZERTIFIZIERUNG

Der Schlussbericht über die Konzeptarbeit der EAWAG zusammen mit dem Verein für umweltgerechte Elektrizität (VUE) für ein Modell für eine vereinfachte Umweltzertifizierung der Kleinwasserkraftwerke [8] wurde inzwischen veröffentlicht. Er zeigt die Möglichkeiten für Kostensparnisse durch eine Vereinfachung des Verfahrens und gemeinsames Vorgehen für die Zertifizierung auf, jedoch auch die Grenzen des Modells bei den Pico-Kraftwerken, wo die Kosten pro Kilowattstunde wegen der kleinen Jahresproduktion zu hoch ausfallen.

Ein weiteres Problem ist noch nicht gelöst: Viele Kleinstwasserkraftwerke mit Altrechten können das Label *naturemade star* ® nicht erhalten (ein gleichwertiges alternatives Label ist nicht in

Sicht), weil sie dessen Basisanforderungen der Umweltauflagen auf dem Niveau heutiger neuer Konzessionen nicht erfüllen können [14]. Viele dieser Werke können weder Fischtreppe noch grosse Restwasser bieten, unterhalten jedoch naturnahe Ausleitgewässer (zum Teil sogar Schutz-inventarisierte Objekte) und würden deshalb die Bezeichnung *sehr umweltfreundlich* verdienen. Hier müsste ein Ausgleich von Plus- und Minuspunkten stattfinden können, und auch die gute Gesamtumweltbilanz müsste angerechnet werden. Dies ist umso dringender, als hier nicht nur bestehende Produktionsstätten

besser im Markt positioniert werden, sondern mit den höheren Erträgen die von Stilllegung wegen Unrentabilität bedrohten Kraftwerke und Weiher gerettet werden könnten. In den meisten Fällen handelt es sich um Pico-Kraftwerke im Niederdruckbereich, mit wesentlich höheren Produktionskosten als die energiegesetzlichen 15 Rp./kWh. Ihre Situation ist aufgrund von ehehaften Rechten oder zeitlich unbeschränkten Konzessionen rechtmässig, bei einer Bewilligung nach heutigen Gesetzen würden sie jedoch die Hürde der minimalen Restwassermenge nicht mehr schaffen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Von den laufenden Projekten konnten sieben Projekte inklusive Erfahrungsberichte des ersten Betriebsjahres abgeschlossen werden, eines scheiterte, und drei wurden plangemäss fortgesetzt. Eine Anlage ging in Betrieb - der Erfahrungsbericht folgt in einem Jahr (Kleinwasserkraftwerk Sursee). Zwei Projekte wurden wegen Bewilligungsfragen verschoben. Die Projekte des Kleinturbinenlabors MHyLab für eine Niederdruckturbine und der Kraftwerke Oberhasli für eine Energieumwandlung mit Doppelkonen [7] erreichten die Messphase und werden 2002 zu Ende geführt.

Kleinwasserkraftwerk Gerberei Gerber, Langnau [3], Pico-Kanalkraftwerk an der Ilfis: Das Demonstrationsprojekt für unregulierte axial-Tauchturbinen (11 kW, 1,3 m Nutzgefälle) zeigt, dass der Einsatz von kostensparenden Einfachtechnologien nicht risikofrei ist, sogar wenn ein bewährtes Produkt von einem etablierten Lieferanten für hydraulische Maschinen eingesetzt wird. Wegen Wirkungsgradmängeln musste nachgebessert werden, und es wurde schlussendlich nur etwas mehr die Hälfte der projektierten Energieproduktion erreicht. Dennoch ist dieser Weg angesichts der hohen Energiegestehungskosten von Pico-Niederdruck-Kleinwasserkraftwerken der richtige. Die Einfachbau-Turbinen müssen weiter entwickelt werden.

Elektrifizierung Säge Oberwil bei Büren [4], Arbeitspunktregelung eines überschlächtigen Mühlrades (2 kW, 7 m): In diesem Pilotprojekt für drehzahlvariable Steuerung geht es darum, das Wasserrad bei verschiedenem Wasserdargebot immer in der Drehzahl mit dem besten Wir-

kungsgrad zu halten, was bei überschlächtigen Rädern bei voller Füllung der Becher der Fall ist. Bei Turbinen und umgekehrt betriebenen Pumpen gibt es andere Charakteristiken für den optimalen Wirkungsgrad, aber die Regelaufgabe ist vergleichbar. Mit dem Fortschritt beim Preis-Leistungs-Verhältnis der Leitungselektronik gewinnt die Drehzahlvariation gegenüber der Regelung mittels Schaufelverstellung vor allem bei Maschinen sehr kleiner Leistungen an Bedeutung. Die Technologie findet in Europa nach und nach mehr Beachtung und sollte auch in der Schweiz angewendet werden. So wurde an der Donau ein Kraftwerk mit einer *Matrix* kleiner mechanisch unregulierter Turbinen eingesetzt (ein Förderprojekt der EU <http://www.caddette.org/assets/101art2.pdf>)

Mechanisch unregulierte, drehzahlvariable Axialturbine: Dieses Pilotprojekt verfolgte einen umfassenden innovativen Ansatz einer **drehzahlvariablen und wassergeschmierten Aussenkranz-Generator-Turbine** (1,5 bis 10 kW, 1,5 bis 7 m). Es wurde mit **neuen Schaufelmaterialien** gearbeitet, und für einen guten Geschwemmseldurchgang wurde die **Nabe weggelassen**. Das Projekt ist leider als gescheitert einzustufen. Die Gründe liegen darin, dass zu viele Innovationen mit dem selben Prototyp angegangen wurden und die Anforderungen an die Hydraulik unterschätzt wurden. Die innovativen Ansätze sollten weiterverfolgt werden.

Kleinwasserkraftwerk Rüttenen, Nutzung des Bergwassers aus dem Seelisbergtunnel [5], Demonstrationsprojekt (100 kW, 47 m): Dieses Beispiel lehrt, dass **Bergwasser** sehr ungleich anfallen kann, rasch anspringt und ag-

gressiv sein kann. Diese Probleme wurden erkannt und rechtzeitig gelöst. Für den landschaftlich sensiblen Standort am Ufer des Vierwaldstättersees wurde eine ansprechende architektonische Lösung gefunden.

Kleinwasserkraftwerk Wannenfluh, Rüderswil [6], innovatives Konzept eines Niederdruck-Wasserkraftwerks (395 kW, 3,8 m): Das Projekt ist ein Musterbeispiel für die energetische **Nutzung bestehender Schwellen**, welche aus Wasserbaugründen bestehen bleiben. Zusammen mit dem Kraftwerk wurde ein Umgehungs-gewässer für die Fischdurchgängigkeit erstellt. Das Schlauchwehr passt sich gut in das Landschaftsbild ein. Alle wesentlichen Anlagenteile sind unterirdisch angeordnet. Der Bericht gibt über die Finanzierung und verschiedene Erfahrungen Auskunft.

Wasserturbinenanlage Papierfabrik Perlen [7], Erneuerung und Reaktivierung eines **Ultraliederdruck-Kraftwerks** an der Reuss: Erstmals

wurde in der Schweiz das **Saugheberprinzip konsequent durchgezogen** (s. Titelbild). An den drei vertikalen über dem Oberwasserstand eingebauten Kaplan-turbinen wurden die Leitschaufeln fix und statisch tragend eingeschweisst. Weil durch eine belüftete voll geheberte Turbine kein Wasser fließen kann und somit Wartungsarbeiten ohne Entwässerung der Einlaufspirale durchgeführt werden können, sind auch keine Einlaufschützen notwendig. Steuerung und Regelung werden einfacher, die Notabschaltung wird durch das Belüften schneller und zuverlässiger eingeleitet. Zum Anlaufen genügen kleine Vakuumpumpen, zum Abstellen Belüftungsklappen. Dies ersparte mehr als 20 % Erstellungskosten, ohne eine Produktionseinbusse gegenüber dem *klassischen* Kaplankonzept. Die hydraulischen Konturen sind von Grossmaschinen entliehen, da bei 1 MW Leistung eine Konturvereinfachung nicht ökonomisch gewesen wäre.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Die Ziele 2001 konnten einigermassen erreicht werden. Quantitativ blieb aus Gründen der Stagnation der Wasserkraftbranche vor der umstrittenen Marktöffnung etliches unter den Erwartungen.

Die im **Forschungskonzept CORE 2000 • 2003** genannten Ziele sind unterschiedlich schwierig zu verfolgen:

Das erste Ziel, die Kostenreduktion vor allem von sehr kleinen Kraftwerken mittels **Kompaktbauart und Standardisierung**, kommt mit einigen Demonstrationsanlagen und den Arbeiten im Kleinturbinenlabor MHyLab zwar (langsam) voran, starke inländische Industriepartner fehlen jedoch. In diesem Sektor ist unter Umständen eine europäische Zusammenarbeit ein besserer Weg. Da die europäische Kleinturbinenindustrie dieses Ziel bei grösseren Kleinturbinen mit gutem Erfolg verfolgt, reduziert sich der Handlungsbedarf für das Programm Kleinwasserkraftwerke wegen fehlendem inländischen Industrieinteresse auf den vernachlässigten unrentablen Bereich der Niederdruck-Pico-Turbinen und Wasserräder sowie auf bauliche und wasserbauliche Konzepte. Wasserräder haben in Deutschland eine Renaissance erlebt, weil sie gegenüber sehr kleinen Turbinen Betriebsvorteile bieten (Geschwemm-

sel-Unempfindlichkeit, breiter Einsatzbereich usw.).

Das zweite Ziel, **falltypische Pilot- und Demonstrationsanlagen** zu fördern und bekannt zu machen, kann mit der Vielzahl bereits abgeschlossener kleiner und grosser Projekte erreicht werden. Mit einer Auswertung der Erfahrungen und einer intensiveren Umsetzung der Berichte können in den nächsten Jahren weitere Fortschritte erzielt werden. Da viele Kleinkraftwerk-Betreiber ihre Anlagen mit Eigenleistungen in Planung und Ausführung bauen und erneuern, sind Anlagenbesichtigungen und Erfahrungsaustausch sehr nützlich. Es ist geplant einen umfassenden aktualisierten Führer über die vielen Demonstrationsanlagen in den Broschüren DIANE und den P+D-Projekten zu erstellen (CD-ROM, Internetliste und/oder Broschüre).

Im Bereich der **Abwasserkraftwerke** ist trotz der Demonstrationsanlagen und der Potential- und Standortliste von DIANE sowie dem Projekt *Energie in ARA* seit 1995 keine Anlage mehr realisiert worden. Hier müssen offenbar gezieltere Vorgehensmodelle entwickelt werden. Bei **Trinkwasserkraftwerken** hat sich das Vorgehen, überschüssigen Leitungsdruck mit Turbinen abzubauen, bewährt. Es gehört heute zum Stand der Technik.

Das dritte Ziel, die Förderung **innovativer technischer Lösungen und Einfachkonstruktionen**, kann mangels Budgetmittel nur punktuell verfolgt werden. Abgesehen von *exotischen*, Doppelkonus-Projekt ist vor allem die Drehzahlregelung förderwürdig. Bei den zwei innovativ-

sten Demonstrationsprojekten der letzten Jahre, dem Coanda-Rechen und der Heberturbine, konnte ein Umsetzungserfolg verzeichnet werden. Diese Lösungen werden heute von etlichen Ingenieuren angeboten.

Liste der P+D-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

Unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden.

- [1] Ingenieurbureau Aegerter & Bosshard, *Basel* (aebo@aebo.ch), für Wasserversorgung *Reinach* und Umgebung: **Trinkwasserkraftwerk Rebberg, Reinach (6 kW, 22 m)**, (SB) intern.
- [2] Ingenieurbüro Cavigelli und Partner, *Illanz* und Ingenieurbüro Brüniger und Co. AG, *Chur*, für Gemeinde *Vignogn*: **Trinkwasserkraftwerk Curtin Claus, Vigogn (13 kW, 100 m)**, (SB) intern.
- [3] P. Kast, Ingenieurbüro Peter Kast, *Münchenbuchsee* (ingkast@mydiar.ch): **Kleinwasserkraftwerk Gerberei Gerber, Langnau, Pico-Kanalkraftwerk an der Ilfis. Demonstrationsprojekt für unregulierte axial-Tauchturbinen (11 kW, 1,3 m)**, (SB).
- [4] B. Wepfer, Ingenieurschule Grenchen-Solothurn, *Grenchen*: **Elektrifizierung des Wasserrades Kislig, Oberwil bei Büren, Arbeitspunktregelung eines oberschlächtigen Mühlrades; Pilotprojekt für drehzahlvariable Steuerung (2 kW, 7 m)**, (SB).
- [5] K. Odermatt (k.odermatt@ewn.ch), EW Nidwalden, *Stans*: **Kleinwasserkraftwerk Rüteneu, Nutzung des Bergwassers aus dem Seelisbergtunnel, Demonstrationsprojekt (100 kW, 47 m)**, (SB).
- [6] A. P. Engel, Hydrelec Ingenieure, *Mandach*: **Demonstrationsprojekt Kleinwasserkraftwerk Wannenfloh, Rüderswil, Innovatives Konzept eines Niederdruck-Wasserkraftwerks (395 kW, 3,8 m)**, (SB).
- [7] H. P. Leutwiler (hleutwiler@iteco.ch), ITECO Ingenieurunternehmung AG, *Affoltern am Albis*: **Demonstrationsprojekt Saugheber-Turbinen, Wasserturbinenanlage Papierfabrik Perlen, Erneuerung und Reaktivierung eines Ultraniederdruck-Kraftwerks an der Reuss (1 MW, 2,6 m)**, (SB).
- [8] J. Stark (js_dct@netsurfer.ch), Double-Cone Technology AG, *Thun*: **DCT: Reverse Pumping Project**, interne Statusberichte: 4th Intermediate Report, January to June 2001; 5th Intermediate Report, July to December 2001.

Referenzen

- [9] F. Bieri (fredi.bieri@swissonline.ch), *Romanshorn* und H. P. Leutwiler (iskb@iskb.ch), *Affoltern am Albis*, Interessenverband Schweizerischer Kleinkraftwerk-Besitzer (ISKB): **Kleinstwasserkraftwerke in der Schweiz: Zuwachs 1985 bis 2001, Presseauswertung und Umfrageergebnisse Kleinstwasserkraftwerke bis 300 Kilowatt**, Synthesebericht Studien 1985 - 1997 und 1998 -2001 (SB).

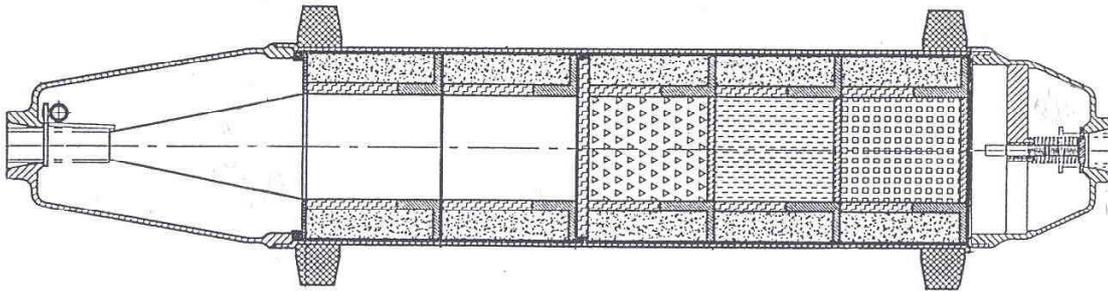
- [10] Dr. J. Kuster / Philip Suter, BHP – Hanser und Partner AG, Zürich: **Bundesbeiträge an Vorstudien für Kleinwasserkraftwerke Realisierungsstand der Vorstudienprojekte 1992 bis 2000** (SB).
- [11] M. Hintermann (hydrosolar@datacom.ch), Hydro-Solar AG, Niederdorf: **Elektrizität aus Trinkwasser-Systemen / L'eau potable génératrice d'électricité, Inventar und Potentialerhebung / Inventaire et étude du potentiel**. BBL, Vertrieb Publikationen: 805.752 d+f vergriffen (als Kopie erhältlich bei ENET).
- [12] R. Chenal (raymond.chenal@bluewin.ch), Ingénieur Conseil, Clarens, C.-A. Vuillerat et J. Roudit, B+C Ingénierus, Montreux: **L'eau usée génératrice d'électricité / Elektrizität aus Abwasser-Systemen; Concept, réalisation, potentiel / Konzept, Realisation, Potential**. BBL, Vertrieb Publikationen: 805.209 d+f.
- [13] H. P. Leutwiler (pk@iteco.ch), Programm Kleinwasserkraftwerke, Affoltern am Albis: **Merkblatt 4, Kriterien für Pilot- und Demonstrationsanlagen**, erhältlich in d, f, i oder unter www.smallhydro.ch/deutsch/foerderung/info_P&D/mbl4_kriterienP&D.htm (nur in deutsch)
- [14] Dr. B. Truffer (bernhard.truffer@eawag.ch), EAWAG, Kastanienbaum und B. Seiler (benno.seiler@econcept.ch), Econcept, Zürich: **Umweltzertifizierung Kleinwasserkraftwerke, Grundlagen und Konzept für ein vereinfachtes Verfahren**, (SB) ENET 210057.
- [15] J. Bürgi (jahibirren@bluewin.ch), Schindellegi und H. P. Leutwiler (iskb@iskb.ch), Affoltern am Albis: **Jahresbericht des Interessenverbandes Schweizerischer Kleinkraftwerk-Besitzer (ISKB) 2001**, publiziert auf: www.iskb.ch, Bezug: iskb@iskb.ch

NUKLEARE SICHERHEIT UND ENTSORGUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2001

Wolfgang Kröger

wolfgang.kroeger@psi.ch



Probenahme- und Rohrpostkapsel PASSIVE

Forschung zu schweren Unfällen. Messung der bei der Druckentlastung des Sicherheitsbehälters in die Umgebung freigesetzten Radioaktivität. Unten: Filtereinheiten zur Dampftrocknung und zur Rückhaltung von Partikeln und Jod.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Kernenergieforschung des Bundes ist klar ausgerichtet auf die beiden Schwerpunkte *Sicherheit von Kernreaktoren* und *Entsorgung radioaktiver Abfälle*. Im Zentrum des Interesses stehen dabei das Verhalten der Reaktorsysteme bei Störfällen und jenes der eingesetzten Materialien und Komponenten mit zunehmender Einsatzdauer sowie Rückhaltemechanismen eines zukünftigen Endlagers. Ferner werden neue Anforderungen bis hin zum Gebot der Nachhaltigkeit an zukünftige Kernanlagen, Brennstoffkonfigurationen und -zyklen aktiv verfolgt; diesbezügliche technische Lösungen werden bewertet und 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. In dem genannten Rah-

men werden auch wissenschaftliche Expertisen erarbeitet und Dienstleistungen erbracht; der sichere Betrieb der im Rahmen dieser Forschung notwendigen (nuklearen) Anlagen ist zu gewährleisten.

Der geographische Schwerpunkt dieser Forschung liegt im Bereich *Nukleare Energie und Sicherheit* (NES) des Paul Scherrer Institutes (PSI). Die Beiträge der Hochschulen konzentrieren sich auf die Lehre; Doktoranden und Diplomierende führen aber ihre Forschungsarbeiten meist am PSI durch. Etwa 40% der Vollkosten werden durch die Elektrizitätswirtschaft (UAK und Nagra), das BFE (bzw. die HSK) sowie das BBW für die EU-FP gedeckt. BFE/HSK steuern ca. 9% der Drittmittel für regulatorische Sicherheitsforschung bei; darauf geht der nachfolgende Jahresüberblick der HSK nochmals gesondert ein.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

SICHERHEIT UND SICHERHEITSBEZOGENE BETRIEBSPROBLEME SCHWEIZERISCHER KERNKRAFTWERKE

STARS [1]: Das Projekt *STARS* wird mit Unterstützung durch die *HSK* durchgeführt. Es befasst sich mit der Analyse von Betriebstransienten und angenommenen Störfallabläufen in den KKW der Schweiz. Dabei benützt man Rechen-codes nach modernstem Stand von Wissenschaft und Technik, in denen detaillierte reaktorphysikalische und thermohydraulische Systemzusammenhänge modelliert sind.

Im Berichtsjahr 2001 konnte mit der generischen Simulation eines Bruches der Hauptdampfleitung eines Druckwasserreaktors ein wichtiger Meilenstein erreicht werden, indem eine dreidimensionale Reaktorkinetik in die transiente Systemanalyse eingeführt wurde. Erstmals wurde mit dem Systemcode *RETRAN-3D* jedes Brennelement einzeln thermohydraulisch in das Gesamtsystem einbezogen. Mit der Teilnahme am internationalen Peach Bottom Turbine Trip Benchmark wird diese neue Analysetechnik auch für Siedewasserreaktoren erprobt. Für die beiden ersten Benchmark Phasen wurden bereits je eine Lösung erarbeitet. Besonders ergab eine dreidimensionale Berechnung der Leistungsexkursion

mit *CORETRAN* eine sehr gute Übereinstimmung mit den Testresultaten.

Im Berichtsjahr hat man sich auch weiterhin auf Analysen für Siedewasserreaktoren konzentriert. Das führte zu einer vertraglichen Vereinbarung zwischen dem Paul Scherrer Institut und dem Kernkraftwerk Leibstadt auf dem Gebiet der Störfallanalysen. Einige Fragestellungen konnten bereits behandelt werden, wie zum Beispiel das transiente thermohydraulische Verhalten des Speisewassersystems unter verschiedenen nicht bestimmungsgemässen Bedingungen. In einem speziellen Fall konnten Empfehlungen für geplante Modifikationen von Anlagenteilen ausgearbeitet werden. Ein Mitarbeiter von *STARS* arbeitete als Experte an der Planung neuer Stabilitätstests für die Anfahrphase des Kernkraftwerks Leibstadt mit.

Mit der Beteiligung am internationalen LOCA-Validierungsprojekt für *TRAC-BF1* wird eine bessere Absicherung der SWR LOCA-Analyse angestrebt. Gute Resultate für die Berechnung des Dampf-volumens konnten mit der Nachrechnung von ausgesuchten Einzeleffekten erzielt werden.

Der Einsatz von sog. Best-estimate Methoden erfordert eine Abschätzung der Rechenunsicher-

heit. Über eine Doktorarbeit wird versucht, die Ermittlung von Unsicherheiten von Code-Modellen auf eine statistisch fundierte Weise von verfügbaren experimentellen Datenbasen möglichst objektiv abzuleiten. Neben der Erarbeitung des detaillierten Forschungsplanes wurden für einzelne der in Betracht gezogenen statistischen Methoden Test-Anwendungen entwickelt.

Damit das Projekt *STARS* weiterhin eine Expertenorganisation für die *HSK* bleiben kann, wurde der Aufbau eines zertifizierbaren QMS in Angriff genommen; etwa 80% der dafür notwendigen Dokumente wurden entworfen. Parallel dazu wird ein elektronisches Archivsystem auf der Basis eines kommerziell verfügbaren Dokumenten-Managementsystems aufgebaut. Die Pilot-Entwicklung wurde als erste Projekttranche freigegeben.

HUMAN RELIABILITY ANALYSIS (HRA) [2]:

Die Arbeit, die von der *HSK* gefördert wird, konzentrierte sich im Berichtsjahr auf die Ableitung von Schlussfolgerungen aus der Pilotstudie zur Analyse von *Errors of Commission* (EOC). Das sind vom Betriebspersonal durchgeführte Massnahmen, die nicht hilfreich sind, sondern Störfallsituationen eher noch verschlechtern. EOC stellen deshalb hohe Anforderungen an Sicherheitsstudien, weil die Zahl von möglichen unerwünschten Handlungen in einer gegebenen Situation sehr gross sein kann, und weil auch entsprechende Situationen sehr zahlreich sind. In der Pilotstudie wurde die vom PSI entwickelte CESA-Methode zur Identifizierung von EOC angewendet. Etwa 30 plausible Szenarien, in denen EOC auftreten können, konnten mit dem CESA-Suchschema identifiziert werden, welches sich konsequent auf Systeme und Funktionen konzentriert, die für das Risiko bedeutsam sind.

Ein erstes Ziel bestand darin, eine kleine Anzahl von Szenarien auszuwählen und detailliert zu analysieren, um allgemeine Typen von Situationen, die zur EOC führen können, zu klassifizieren und zu verstehen. Dieses Verständnis wird genutzt, um die Identifizierungsmethode zu ergänzen. So sollte z.B. dem Einstieg in falsche Störfallvorschriften vornehmlich dann Beachtung geschenkt werden, wenn sich die entsprechenden Anlagenparameter im Grenzbereich der Einstiegskriterien verschiedener Vorschriften bewegen. Derartige Situationen können aufgrund der Dynamik des Anlagenverhaltens auftreten.

Weiterhin wurden die analysierten Szenarien mit dem Ziel untersucht, die Eigenschaften der Situa-

tionen und Handlungselemente zu charakterisieren, die Schwierigkeiten bei der Quantifizierung von Fehlerwahrscheinlichkeiten aufwerfen. Diese Schwierigkeiten zeigen den Bedarf an verfeinerten Daten über Wahrscheinlichkeiten. Die Szenarien beinhalten auch grundsätzlich unterschiedliche Arten von Entscheidungen der Operateure. Somit können Schwerpunkte für die Informationssammlung bei der Auswertung von Ereignissen (aus Betriebserfahrung und Simulatorübungen) definiert werden, um Fortschritte bei der Entwicklung von Methoden zur Analyse menschlicher Zuverlässigkeit zu erzielen.

LWR-PROTEUS [3]: Die Deregulierung des Strommarktes und die angestrebte Verringerung der Energiekosten beeinflussen auch die Entwicklung neuer nuklearer Brennstoffe und die Optimierung des Betriebs von Kernkraftwerken. Eine der vielversprechendsten Strategien zur weiteren Optimierung des Brennstoffzyklus besteht in der Erhöhung des Abbrandes, um pro Brennelement mehr Energie in Wärmeenergie umwandeln zu können. Einen höheren Abbrand kann man zum Beispiel erreichen, wenn man die mittlere Anreicherung des Brennstoffs mit U-235 heraufsetzt und die Beständigkeit der Hüllrohre im Betrieb erhöht. Allerdings ist höherer Abbrand auch mit vermehrter Bildung von Actiniden und Spaltprodukten verbunden. Das wiederum erhöht die Nachzerfallswärme, was längere Kühlzeiten im Brennelementlagerbecken bedingt. Ausserdem müssen neue Sicherheitsmassnahmen zur Beherrschung der Kritikalität bei Transport und Lagerung überdacht werden.

Eine Reihe von Forschungsprojekten befasst sich mit der Validierung von LWR-Brennstoffen für höheren Abbrand. Eines davon ist das experimentelle reaktorphysikalische Projekt LWR-PROTEUS Phase II, das im Paul Scherrer Institut beheimatet ist und vom *UAK* finanziell unterstützt wird. Ziel dieses Projekts ist die detaillierte Messung der 18 wichtigsten Actiniden und die Bestimmung von bis zu 28 individuellen Spaltproduktkonzentrationen in einer Anzahl von UO_2 - und MOX-Brennstabproben aus dem Kernkraftwerk Gösgen-Däniken. Ein weiteres Ziel ist die Messung der Abnahme der Reaktivität dieser Probestäbe während des weiteren Abbrandes in der kritischen Reaktoranlage *PROTEUS*.

Die Anlage *PROTEUS* wurde modifiziert, um im Berichtszeitraum die Reaktivitätsexperimente vorzubereiten. Ein grössenrichtiges repräsentatives Modell von frischen Brennstäben für Druckwasserreaktoren wurden von Gösgen aus trans-

portiert und von *PROTEUS* aufgenommen. Der Testbehälter von *PROTEUS* konnte so modifiziert werden, dass er im Zentrum der Testzone lokalisiert werden konnte. Die später vorgesehene, bisher einmalige, Einführung von hochabgebrannten, hochaktiven Proben in *PROTEUS*, machen spezielle Abschirmkomponenten und die Einübung komplexer Prozeduren erforderlich. Hierfür wurde ein 6 t schwerer Container entworfen und gebaut. Eine entfernbare Tragestruktur soll den Container oben in der Mitte über dem Kern halten. Nachdem diese Modifikationen und eine Teilgenehmigung durch die *HSK* vorhanden waren, wurde im Juli 2001 mit einer Inbetriebnahmeperiode begonnen. Deren Zweck waren die Einrichtung und Kalibrierung neuer Mess- und Datenverarbeitungssysteme und die Ausarbeitung eines Messplanes. Die endgültige Genehmigung durch die *HSK* erfolgte im Dezember 2001. Damit können die Experimente mit hochabgebrannten Brennstoffproben im Frühjahr 2002 beginnen.

LWR-KONTAMINATION [4]: In diesem von der *HSK* geförderten Projekt geht es um Studien zur Rolle der Wasserchemie bei der Aktivitätsaufnahme und dem Alterungsverhalten von Kernkraftwerkskomponenten aus rostfreiem CrNi-Stahl. Im Jahr 2001 wurden experimentelle Untersuchungen sowohl zur SWR- Normal-Wasserchemie (NWC)- als auch zur Wasserstoff-Fahrweise (HWC) durchgeführt. Die Versuchstechnik wurde an Materialproben eingesetzt, die mit dünnen Platinschichten überzogen waren. Die Beschichtungen erfolgten mit unterschiedlichen Verfahren und Techniken. Das Verfahren von General Electric erhöht den Schutz gegen Risskorrosionsanfälligkeit. An den CrNi-Stahloberflächen wurde unter HWC- Bedingungen die Abhängigkeit des elektrochemischen Potentials (ECP) von der Platin-Oberflächenbeschichtung bei variierenden H_2 / O_2 - Verhältnissen in simuliertem Reaktorwasser untersucht. Die ECP-Werte von Proben mit inhomogener Platinbeschichtung wurden gemessen und mit den Werten von Proben mit homogener Platinbeschichtung verglichen. Die Platinmenge, die erforderlich ist, um die ECP-Werte unter -230 mV zu halten, konnte quantitativ ermittelt werden. Schliesslich wurden Tracerversuche mit Co-60 durchgeführt um abzuklären, ob die HWC-Fahrweise einen negativen Einfluss auf die Kobaltadsorption der CrNi-Stahloberflächen ausübt. Eine zuverlässige Bewertung war wegen der nur geringen Anzahl an Proben noch nicht möglich.

Eine weitere Projektteilaufgabe befasste sich mit der thermodynamischen Modellierung der Oxidbildung auf rostfreiem CrNi-Stahl unter SWR-Wasserchemie-Bedingungen. Es wurde ein Ansatz gefunden, mit dem die Oxidbildungen und die löslichen Verbindungen für verschiedene Wasserqualitäten quantitativ vorausberechnet werden können.

Zum Problem der radioaktiven Kontamination von Oxiden mit Co-60 wurden detaillierte SIMS-Analysen, elektrochemische Impedanzspektren und photoelektrochemische Untersuchungen ausgeführt. Dabei wurde die Diffusion von Kobaltionen in die Korrosionsschichten und deren Beeinflussung durch Zink auf die Struktur und die Halbleitereigenschaften der CrNi-Stahloxide untersucht. Ein Diffusionsmodell ermöglicht jetzt eine Voraussage des Co-Transportes in die Oxide und seine Beeinflussung durch Zink. Photoelektrochemische Analysen wiesen bei Anwesenheit von Zink auf einen komplizierten Übergang vom p- zum n-Typ-Halbleiter der Oxidschicht hin.

Die Arbeiten zur LWR-Kontamination wurden mit Ablauf des Berichtsjahres abgeschlossen.

EDEN [5]: Im Projekt *EDEN* werden mechanisches Verhalten und Korrosionsmechanismen von Zircaloy-Hüllrohren bei hohem Abbrand untersucht. Der Einfluss der Strahlung auf Strukturmaterialien des Reaktorkerns wird ebenfalls studiert. Mit Unterstützung durch die Kernkraftwerke wurde im Jahr 2001 nun versucht, die Oxidationsfront in einem Hüllrohr gerade an der Grenzschicht zwischen metallischem und oxidischem Zirkon mit hochauflösender Transmissions-Elektronenmikroskopie (HRTEM) zu analysieren. Diese Grenzschichtanalysen bei Hüllrohren aus verschiedenen Zirkonlegierungen, hergestellt unter Verwendung unterschiedlicher thermomechanischer Prozesse, und unterschiedlichen Korrosionsbedingungen ausgesetzt, sollen herangezogen werden, um das Verhalten unbestrahlten mit dem Verhalten bestrahlten Materials zu vergleichen. Die Dicke einer ganz innen im Hüllrohr ausgebildeten Oxidschicht, die als Barriere wirken kann, Spannungsbedingungen, Profile von Sauerstoff, der in die Metallphase diffundiert, und Mikroporositäten könnten schlussendlich Hinweise zum Verständnis des schon lange untersuchten komplizierten Korrosionsprozesses erbringen. Dann könnte es möglich werden, den Widerstand eines Hüllrohres gegen Korrosion so zu erhöhen, dass es für Höchstabbrand eingesetzt werden kann. Auch die Brennelementhersteller streben diesem Ziel mit grossem Aufwand

entgegen. Gross angelegte internationale Projekte werden der Validierung solcher Hüllrohre bei Kühlmittelverluststörfällen und bei reaktivitätsinduzierten Transienten dienen.

Analytische Elektronenmikroskopie und HRTEM können beitragen, die oben erwähnte Grenzschicht im Nanometerbereich aufzulösen. Proben, bei denen die Grenzschicht Metall/Oxid sichtbar war, wurden mit einem 200 kV und einem 300 kV Elektronenmikroskop untersucht. Eine inaktive Zircaloy-4 Probe aus dem Autoklaven zeigte ein nicht amorphes Oxid an der Grenzschicht. Auf der Metallseite der Grenzschicht herrschte eine Zugspannung und auf der Oxidseite eine Druckspannung von etwa 400 MPa. Das Oxid war monoklin im Bereich der Grenzschicht. Trotz der hohen Umfangsdruckspannung zeigten sich im Oxid einige radiale Mikrorisse, die der Vorstellung des Barrierenkonzepts widersprechen. Keine Risse wurden auf der Metallseite gefunden.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass HRTEM und analytisches TEM geeignete Methoden für die oben geschilderten Untersuchungen sind. Der Vorteil dieser Techniken beruht auf der Kombination von räumlich hoher Auflösung bei der Beobachtung von Mikrostrukturen und der chemischen Analyse.

BAUTEILSICHERHEIT [6]: Das Ziel 2001 des Projektes, das von der HSK finanziell unterstützt wird, bestand in der Identifizierung und Charakterisierung der wesentlichen Einflussgrößen auf die deformationsinduzierte Martensitbildung bei LCF-Ermüdung austenitischer Stähle und der Auswahl geeigneter magnetischer Kenngrößen und Messtechniken, um den Martensitgehalt zu detektieren.

Zur Bestimmung des Martensitgehalts in Ermüdungsproben wurde das Neutronendiffraktometer DMC für kalte Neutronen der SINQ-Anlage am PSI eingesetzt. Die Neutronen durchdringen den gesamten Probenquerschnitt und ermöglichen bei entsprechend grosser Blende die Bestimmung eines mittleren Martensitgehalts für den gesamten Mittelteil der Proben, in dem die Martensitbildung stattfindet. Die mittels Neutronendiffraktometrie bestimmten Werte dienen als Kalibrierungsdaten für die magnetischen Verfahren. Zur Detektion des Martensitgehalts wurden 3 magnetische Messtechniken eingesetzt. Mit einem einfachen Handprüfgerät wurde die magnetische Leitfähigkeit (Permeabilität), mit der SQUID-Messtechnik die Restfeldstärke (Re-

manenzflussdichte) und mit einem speziellen GMR-Wirbelstromsensor die Wirbelstrom-Impedanz gemessen. Die Ergebnisse der Permeabilitäts- und der Wirbelstromimpedanz-Messungen zeigen sehr gute Korrelationen mit den Neutronendiffraktionswerten. Beide Methoden sind somit prinzipiell geeignet, den Martensitgehalt zu bestimmen. Schwierigkeiten sind abzusehen bei der Übertragbarkeit auf praxisrelevante Bedingungen. Das Handgerät arbeitet in einem eng begrenzten Permeabilitätsbereich und hat eine geringe Feldempfindlichkeit, das Wirbelstromsignal hängt von Proben- und Sonden-geometrie sowie von lokalen Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit ab. Eine bessere Übertragbarkeit sollte mit der SQUID-Messtechnik möglich sein. Die entsprechenden Messungen stehen noch aus.

Im Berichtszeitraum wurde das Risskorrosionsverhalten von ferritischen Reaktordruckbehälter(RDB)-Stählen (unbeeinflusster Grundwerkstoff und Wärmeeinflusszonen) und von RDB-Schweissgutwerkstoffen unter transienten und stationären Siedewasserreaktor-Betriebsbedingungen experimentell untersucht. Die Versuche unter konstanter Last und monoton ansteigender Last mit konstanter Lastrate sowie bei niederfrequenter zyklischer Belastung mit Bruchmechanikproben in sauerstoffhaltigem Heisswasser bei Temperaturen zwischen 150 und 288 °C lieferten interessante Zwischenergebnisse.

Als wesentliche Einflussparameter wurden das Korrosionspotential (ECP), der Sulfat-Gehalt und die Temperatur der Umgebung, der Schwefel-Gehalt des Stahls sowie Belastungsgeschwindigkeit und -höhe identifiziert. Die Anfälligkeit gegen dehnungsinduzierte Risskorrosion (DRK) nimmt mit ansteigendem ECP, Sulfat-Gehalt der Umgebung und Schwefel-Gehalt des Stahls zu. Unter stark oxidierenden Bedingungen (ECP > 100 mVSWE) wurde in allen Werkstoffen ein Maximum der Anfälligkeit bei mittleren Temperaturen (» 200 - 250 °C) und sehr niedrigen Dehnraten (10^{-6} - 10^{-4} s⁻¹) beobachtet. Die DRK-Risswachstumsraten waren für alle Werkstoffe sehr ähnlich und nahmen mit ansteigender Dehnraten und ansteigender Temperatur bis zu einem Maximum bei 250 °C zu. Das Maximum der DRK-Anfälligkeit bei mittleren Temperaturen wird auf die Dynamische Reckalterung dieser Stähle zurückgeführt. Dieses Verhalten und der Gehalt an interstitiell gelöstem Stickstoff und Kohlenstoff können demnach ebenso wichtig sein wie der Schwefel-Gehalt dieser Stähle. In

zyklischen Versuchen wurde unter stark oxidierenden Bedingungen ($ECP > 100$ mVSWE) für alle Temperaturen und Werkstoffe eine Zunahme des Rissfortschritts durch Schwingrisskorrosion pro Zyklus mit abnehmender Belastungsfrequenz beobachtet. Stabiles, stationäres Schwingrisskorrosions-Risswachstum wurde bis hinab zu sehr niedrigen Frequenzen von 10^{-5} Hz festgestellt. Die Risswachstumsraten waren für alle Werkstoffe sehr ähnlich und nahmen mit ansteigender Temperatur bis zu einem Maximum bei 250 °C zu.

FORSCHUNG ZU SCHWEREN UNFÄLLEN [7]:

Bei manchen denkbaren Störfallszenarien in Kernkraftwerken in der Schweiz kann zur Unfallbeherrschung eine Druckentlastung des Sicherheitsbehälters durchgeführt werden. Diese Druckentlastung erfolgt über wirksame Wäscher und Filter in die Umgebung des Kernkraftwerks. Da aber kein Filter über einen Rückhaltungswirkungsgrad von 100% verfügt, können luftgetragene radioaktive Aerosolpartikeln und Jod auch in die Umgebung gelangen. Um das Ausmass einer möglichen Landkontamination und den Quellterm für Inhalation abschätzen zu können, veranlasste die HSK die Entwicklung einer Messeinrichtung, mit der im Abgasstrom des Druckentlastungsfilters die nuklidspezifische Radioaktivität und die physikalische und chemische Form des freigesetzten Jods bestimmt werden kann. Die HSK erstellte eine Reihe von Spezifikationen, die durch ein solches Messsystem erfüllt werden müssen. Die wichtigsten Anforderungen sind:

Bestimmung der physikalischen Form der Aktivität (Aerosolpartikeln oder Gas), Unterscheidung zwischen molekularem und organischem Jod, Messfehler geringer als Faktor 3, Verwendung ausschliesslich passiver Komponenten (kein Energiebedarf), Einhaltung der Standards gegen Erdbeben, Einhaltung der Standards für mechanische und elektrische Systeme.

Ein kommerzielles System, das diesen Anforderungen entspricht, existiert nicht. Deshalb wurde das *PSI* von der *HSK* und den Kernkraftwerken in der Schweiz beauftragt, ein entsprechendes Konzept zu entwickeln. Die Entwicklungskosten werden zum grössten Teil vom *UAK* getragen. Es entstand das in-situ passive Messsystem *PASSIVE*, das im Berichtszeitraum experimentell verifiziert werden konnte. Das System besteht aus folgenden Komponenten: Messkapsel, Messstation, passives Gasansaugsystem, Beladungs- und Empfangsstation, Rohrpostsystem, Überwachung und Datenerfassung, unabhängiges Luftdrucksy-

stem (s. Titelblatt). Die Messkapsel besteht aus Aerosolfiltern, spezifischen Adsorptionsbetten für Jodspezies und Feuchtigkeitsadsorptionszellen. Die Messstation kann an jedem Ort stromaufwärts am Auslass des Druckentlastungssystems eingerichtet werden. Das passive Ansaugsystem, das in-situ innerhalb der Druckentlastungsleitung positioniert wird, sorgt für eine isokinetische repräsentative Teilströmung. Diese wird durch die Messkapsel geleitet, ohne dass externe Energie oder bewegliche Teile notwendig wären. Die Belade- und Empfangsstation befindet sich in einem Raum, der während des Unfalls von Operateuren begangen werden kann. Das Rohrpostsystem transportiert die Messkapsel auf dem Weg zwischen Belade- und Empfangsstation und der Messstation in beiden Richtungen. *PASSIVE* erfüllt alle Anforderungen der *HSK* und erlaubt einen sicheren und fehlerfreien Betrieb. Das Design ist auf das Kernkraftwerk Beznau abgestimmt, kann aber auch an die anderen Kernkraftwerke angepasst werden.

Es wurde ein experimentelles Programm durchgeführt, um das Messkapselsystem unter prototypischen Bedingungen zu überprüfen und zu optimieren. Zum Test wurden inaktives Aerosol sowie elementares und organisches Jod verwendet. Die Testresultate zeigten eine Abscheidung in der jeweils verlangten physikalischen Form mit einem Wirkungsgrad von nahe 100%. Auch die Unterscheidung der verschiedenen Jodspezies war sehr zufriedenstellend. Der Messfehler (einschliesslich Aerosol- und Jodverlusten sowie Instrumentenunsicherheiten) war nicht grösser als 10%. Die Konstruktion der Messkapsel erlaubt ein weites Feld von verschiedenen Betriebsbedingungen. Die besonderen Möglichkeiten von *PASSIVE* wurden den Operateuren der Kernkraftwerke und der Genehmigungsbehörde vorgestellt. *HSK* erteilte inzwischen eine Konzeptgenehmigung.

ENTSORGUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE [8]:

Das *PSI/NES* führt ein F&E-Programm durch zur Verstärkung der wissenschaftlichen Basis der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Es erfüllt dadurch eine wichtige nationale Rolle, dass 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 folgenden Gebieten: (a) Grundlagen der Endlagerchemie, (b) Chemie und Physik von Radionukliden an Grenzschichten von Lagermaterialien und Gesteinen und (c) Radionuklid-

transport und Rückhaltemechanismen in geologischen Medien und künstlichen Barrieren. Die durchgeführten Arbeiten sind eine Kombination von experimentellen Untersuchungen in radioaktiven Laboratorien und im Feld sowie theoretische Modellentwicklungen sowie Modellvalidierung. Die Arbeiten werden durchgeführt im Hinblick auf die Schweizer Tiefenlagerprojekte und die Resultate finden ihre Anwendungen in den umfassenden Sicherheitsanalysen der Nagra. Aus den Untersuchungen zur Wechselwirkung von Radionukliden an Grenzflächen hat sich das Projekt entwickelt, an der Schweizerischen Lichtquelle (SLS) des PSI eine MikroXAS (Röntgen-Absorption-Spektroskopie)-Strahllinie zu bauen. Die Auslegungsarbeiten zu dieser Strahllinie wurden auf Ende des Berichtsjahres abgeschlossen. Der Betrieb für Benutzer ist für 2004 vorgesehen.

Im Berichtsjahr wurden die Arbeiten durch Beiträge zum Entsorgungsnachweis Opalinuston der Nagra bestimmt. Der Sicherheitsbericht soll Ende 2002 den Behörden abgeliefert werden. Eine der Hauptaufgaben war, die dazu benötigten geochemischen Daten zu erarbeiten. Sie berücksichtigen die spezifischen Eigenschaften bezüglich Auslegung und Inventar eines Tiefenlagers im Opalinuston des Zürcher Weinlandes und sind über die Speziation von chemischen Elementen in flüssiger Phase miteinander verknüpft.

Die erste Datenbasis ist eine für Löslichkeitsbegrenzungen von Radionukliden im Verfüllmaterial Bentonit. Wenn Radionuklide aus dem verglasten hochaktiven Abfall oder aus abgebrannten Brennelementen in den Bentonit freigesetzt werden, wird der im Porenwasser mobile Anteil durch verschiedene Mechanismen begrenzt. Dies sind Prozesse wie die Bildung von sekundären Festphasen, Mitfällungen und der Einbau in koexistierende Festphasen; auf die Sorption als mobilitätsreduzierendem Mechanismus wird weiter unten eingegangen. Die Grundlage zu einem Verständnis und der quantitativen Evaluation ist eine thermodynamische Datenbasis (TDB). Die ungefähr zehn Jahre alte *Nagra/PSI-TDB* wurde zur Gänze überarbeitet. Dabei wurden die neue Information aus Experimenten und die Resultate der laufenden Evaluation weniger, spezifischer Elemente durch ein Projekt der *OECD/NEA* berücksichtigt. Die in einer TDB enthaltene Information ist jedoch nicht genügend vollständig, um Löslichkeitsbegrenzungen im Rahmen einer Sicherheitsanalyse zu berechnen. Experimentell nicht verfügbare Daten mussten

abgeschätzt und löslichkeitsbegrenzende Festphasen auf einer projektspezifischen Basis ausgewählt werden. Die chemische Zusammensetzung des Porenwassers von kompaktiertem Bentonit musste bestimmt werden. Dies kann nur auf Grund von Modellvorstellungen getan werden, weil die Porenwasserzusammensetzung einer direkten experimentellen Bestimmung nicht zugänglich ist. Basierend auf einem theoretischen Porenwasser, auf dem Inventar von Radionukliden und von stabilen Isotopen im Abfallgut und in den technischen Barrieren wurden dann die Löslichkeitsbegrenzungen für mehr als 30 chemische Elemente evaluiert.

Die zweite Datenbasis ist eine solche für die Sorption von Radionukliden an den für das Tiefenlager relevanten Festphasen. Wenn im Wasser gelöste Radionuklide durch den Bentonit und durch die geologischen Formationen transportiert werden, ist ihre Transportgeschwindigkeit durch Reaktionen an der Flüssig-Fest-Grenzfläche reduziert (Sorption). Sorptionsdatenbasen wurden evaluiert für Bentonit, für Zementmaterialien, für ungestörten Opalinuston und für umgewandelten Opalinuston. Die Umwandlung des Opalinuston findet statt, wenn hochalkalische Grundwässer aus Zementmaterialien in den ungestörten Opalinuston eindringen. Diese Sorptionsdatenbasen beruhen auf Literaturangaben und, zu einem grossen Teil, auf eigenen Messungen und Modellkonzepten wie sie in den vergangenen Jahren gewonnen und entwickelt wurden. Die Hauptschwierigkeit bei der Erstellung der Datenbasen besteht darin, dass die Experimente an verdünnten Systemen mit grossem Wasser-zu-Festphase-Verhältnis durchgeführt werden. Diese Daten müssen nun auf die reale Situation eines kompaktierten Bentonits oder dichten Tongesteins extrapoliert werden. Es wurde ein Konzept zur Extrapolation entwickelt. Dieses beruht auf der Kenntnis der Elementspeziation in flüssiger Phase, auf einem Verständnis der massgeblichen Sorptionsmechanismen und auf der mineralogischen Zusammensetzung der Festphasen. Das Konzept wurde anhand von Informationen aus Diffusionsexperimenten auf seine Konsistenz überprüft. Solche Informationen liegen jedoch nur für ganz wenige Systeme (relevante Elemente und Festphasen) vor.

Die weiteren im Laufe des Berichtsjahres behandelten Themenkreise waren: Weiterentwicklung des Speziationscodes *GEMS* mit Anwendungen auf feste Lösungen; eine weitere Auswertung der laufenden Langzeit-Experimente zur Glaskor-

rosion; mechanistische Sorptionsuntersuchungen an Tonen und Tonmineralien, an Zement und Zementmineralien mit besonderem Schwergewicht auf XAS-Untersuchungen; Untersuchungen zum Einfluss von Organika auf die Radionuklidspeziation und -sorption; Diffusionsexperimente im Labor und im Feld; Mitarbeit an Feldexperimenten im Felslabor Grimsel der Nagra und die Weiterentwicklung von Modellen zum Radionuklidtransport im Nah- und im Fernfeld eines Tiefenlagers.

SICHERHEITSBEZOGENE MERKMALE ZUKÜNFTIGER REAKTORKONZEPTE

FORTGESCHRITTENE BRENNSTOFFZYKLEN

[9]: In einem Leichtwasserreaktor mit Brennstoff aus Urandioxid entsteht während des Betriebs etwas mehr Plutonium als gleichzeitig wieder verbrannt wird (aus U-239 entsteht durch Neutroneneinfang und anschliessend zweimaligen β -Zerfall Pu-239). Eine Möglichkeit, die Zunahme an Plutonium zu verringern, besteht darin, es zu verbrennen indem man Brennstoff aus Mischoxid (MOX) herstellt. Dabei wird im Oxidbrennstoff ein Teil des spaltbaren U-235 durch vorhandenes Pu-239 ersetzt, das beim Betrieb verbraucht wird. Da aber die Brennstoffmatrix immer noch überwiegend U-238 enthält, wird auch mit MOX-Brennstoff neues Plutonium erzeugt. Noch besser wäre es daher, wenn man anstelle von Natururan- oder abgereichertem Uranoxid ein Material mit inerte Matrix als Brennstoffträger (für PuO_2) einsetzen würde. Dieser neue Typ eines *Inert Matrix Fuel* (IMF) besteht aus Oxiden von Plutonium und Erbium (als abbrennbarem Neutronengift), die in Yttrium-stabilisiertem Zirkonoxid eingebettet sind. Die Brennelemente, die MOX ersetzen sollen, werden nach Gebrauch ohne Wiederaufarbeitung direkt in ein Endlager verbracht, weil sie kein für die Energieumwandlung brauchbares Material mehr enthalten.

Im Projekt, das vom UAK unterstützt wird, wurden wichtige Ziele erreicht, obwohl wegen der Nach- und Umrüstung des Hot-Labors im Jahr 2001 praktisch keine experimentellen Laborarbeiten durchgeführt werden konnten. Aber es lief der IMF/MOX Bestrahlungstest IFA-651.1 mit IMF- und MOX-Brennstoff des PSI im Halden Siedewasserreaktor weiter und lieferte wertvolle Ergebnisse. Die Daten aus dem Bestrahlungstest und Daten aus out-of-pile Messungen am ITU Karlsruhe wurden für Modifizierungen am Brennstoffverhaltens-Code *TRANSURANUS* genutzt, um das IMF-Verhalten bei einer hypotheti-

schen Bestrahlung in vier Zyklen in einem kommerziellen Druckwasserreaktor mit einer IMF-Teilladung zu modellieren. Um einen adäquaten Leistungsverlauf für eine Teilladung mit IMF in einem derzeitigen Druckwasserreaktor definieren zu können, wurden Neutronikrechnungen mit dem Core Management System (CMS) durchgeführt. Dabei wurden im *PSI/LRS* die Codes *CASMO & SIMULATE* verwendet. Für die Neutronikrechnungen wurde die Kernbeladung hinsichtlich der Anreicherung in den Brennstäben und des Anteils an abbrennbaren Absorbern optimiert. Der berechnete Leistungsverlauf für den IMF-Stab, welcher nach CMS die höchste lineare Aufheizrate aufwies, wurde als Input für *TRANSURANUS-IMF* ausgewählt.

Die gekoppelten Rechnungen zeigten, dass die Zentraltemperatur im IMF-Stab zu Beginn des Abbrandes wegen der verschiedenen Leistungsverläufe niedriger war als im entsprechenden UO_2 -Stab. Während der höchstbelastete UO_2 -Stab seine höchste Leistung ganz zu Beginn der Bestrahlung erreichte, war dies im entsprechenden IMF-Stab mit Erbium als abbrennbarem Neutronengift erst etwa zu Beginn des zweiten Zyklus der Fall. Zu diesem Zeitpunkt ist der Spalt zwischen Pellet und Hüllrohr bereits geschlossen. Es wurde auch das Design eines Stabes mit und ohne zentraler Bohrung berechnet. Die maximale Zentraltemperatur im Stab mit Loch war deutlich niedriger als die der Spezifikation für UO_2 -Brennstoff. Die Maximaltemperatur des Stabes ohne zentrale Bohrung war dagegen oberhalb des spezifizierten Grenzwertes. Weitere Optimierungen des Designs der Brennelemente mit CMS und dem Code *HELIOS* sind notwendig, um die maximale lineare Stabileistung und damit die Zentraltemperaturen im Brennstoff noch weiter zu senken.

Die Rechnungen zeigten, dass das IMF-Konzept für kommerzielle Kernkraftwerke anwendbar ist. Mittels der CMS Rechnungen wurden verschiedene Vorteile dieses Konzepts deutlich, wie z. B. die Reduzierung der Plutoniummenge für jeden Zyklus um einen Faktor 4 im Vergleich zur MOX-Teilladung. Ausserdem könnte die Zyklusdauer um 5% erhöht werden. *TRANSURANUS-IMF* Rechnungen sind gut geeignet, um das Bestrahlungsverhalten von IMF- mit UO_2 -Brennstoff zu vergleichen.

ALPHA [10]: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der passiven und langfristigen Nachwärmeabfuhr aus dem Sicherheitsbehälter fortgeschrittener Leichtwasserreaktoren nach

Störfällen war und ist ein wichtiges Ziel des Projekts *ALPHA*. Die gewonnenen Erfahrungen und die entwickelten Versuchstechniken, ebenso wie die weiterentwickelten thermohydraulischen Codesysteme, lassen sich aber heute auch mit Vorteil für die Sicherheit auf bestehende Reaktoranlagen übertragen. So richtet sich der Fokus der derzeitigen Projektphase mehr auf generische Aspekte der Thermohydraulik und auf die Weiterentwicklung und vermehrte praktische Anwendung existierender Berechnungsmöglichkeiten, besonders aber auf die Anwendung fortgeschrittener 3D-Codes und CFD Methoden auf Fragen der Reaktorsicherheit.

Im Projekt *FLOMIX-R* (5. Rahmenprogramm der EU) sollen die Daten und die modelltheoretische Behandlung von Strömungsvermischungen und Strömungsverteilungen im Primärkreis von Druckwasserreaktoren verbessert werden. Diese Phänomene sind sehr wichtig für die Borsäureverdünnung und zur Abschätzung der Wärmebelastung von Primärkreis Komponenten. *FLOMIX-R* enthält wohldurchdachte Vermischungsexperimente in verschiedenen dafür geeigneten Versuchsständen. Der wichtigste Beitrag des *PSI* ist die Teilnahme an Benchmark Rechnungen (CFD Modellierungen) für verschiedene dieser Experimente. Ein anderes EU-Projekt, nämlich *ECORA*, versucht die generellen Möglichkeiten von CFD Codes für die Simulation von Strömungen im Primärkreis und im Sicherheitsbehälter von Kernkraftwerken zu evaluieren. Vorausanalysen von ausgesuchten *PANDA* Versuchen zum Sicherheitsbehälter sind die Beiträge des *PSI*. Das Ergebnis von *ECORA* wird später in gemeinsame Projekte innerhalb des CFD Netzwerkes der Europäischen Kompetenzzentren umgesetzt werden.

Nach erfolgreichem Abschluss der Vertragsverhandlungen mit 15 Mitgliedsländern, hat das *OECD* Projekt *SETH* am 1. April 2001 begonnen. Es wird eine Laufzeit von vier Jahren haben. In einer ersten Phase konzentriert man sich auf experimentelle Untersuchungen zu Borsäureverdünnungsstörfällen und den Ausfall der Nachwärmeabfuhr nach Abschaltung eines Druckwasserreaktors. Diese Versuche werden in der Anlage PKL (*Framatome ANP*, Erlangen) durchgeführt. In der zweiten Phase von *SETH* stehen Grosseexperimente zu generischen 3D Vermischungs- und Stratifikationsphänomenen in Multi-Compartment Geometrien der Anlage *PANDA* im Vordergrund. Die Ergebnisse sollen der Validierung und Verbesserung von System-

codes, Containmentcodes und CFD Codes unter besonderer Berücksichtigung des Wasserstoffverhaltens dienen.

Mit dem abschliessenden Workshop am *PSI* im November 2001 wurden die wichtigsten Aktivitäten im Zusammenhang mit dem International Standard Problem (ISP) Exercise No 42 beendet. Die Übung wurde vom *PSI* für die *OECD/NEA/CSNI* mit finanzieller Unterstützung des *PSEL* organisiert. Grundlage für das ISP-42 war ein *PANDA*-Experiment mit sechs voneinander unterscheidbaren Phasen, die typische Zustände von passiven Sicherheitssystemen repräsentierten und spezifische Phänomene beim Auslegungstörfall bei Kühlmittelverlust und darüber hinausgehenden Störfällen abdeckten. Der Versuch wurde so durchgeführt, dass jede Phase unabhängig von den anderen betrachtet werden konnte. ISP-42 erreichte ein hohes internationales Interesse. 50 Beiträge mit 8 verschiedenen Codes von 17 Teilnehmern gab es allein für die blinden Vorausberechnungen (keine Kenntnis der Versuchsergebnisse) und 30 Beiträge mit 6 verschiedenen Codes von 8 Teilnehmern aus 7 Organisationen gab es für die Nachberechnungen (mit Kenntnis der Versuchsergebnisse). Selbstverständlich hatte sich das *PSI* selbst auch an Voraus- und Nachberechnungen mit verschiedenen Codes beteiligt, und selbstverständlich schenkte die Organisation, die den Versuch durchzuführen hatte, besonderes Augenmerk den Vorausberechnungen.

Durch ISP-42 hatten die internationalen Fachleute und Institutionen erstmals die Gelegenheit, an einer Validierungsübung für passive Sicherheitssysteme teilzunehmen. Die im Rahmen von ISP-42 im *PANDA*-Versuch gewonnenen Daten werden noch einige Jahre lang als Standard-Datenbasis für die Bewertung von Codes für passive Systeme dienen können.

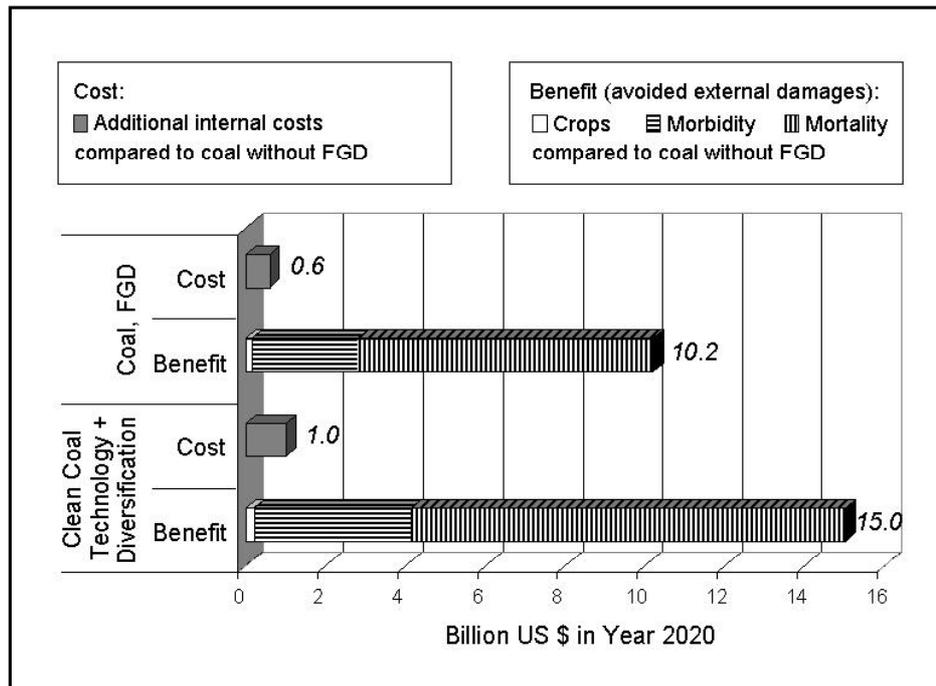
GANZHEITLICHE BETRACHTUNG VON ENERGIESYSTEMEN *GaBE* [11]:

Das *GaBE*-Projekt trägt zum China Energy Technology Program (*CETP*) bei, das im Rahmen der Alliance for Global Sustainability durchgeführt und von *ABB* finanziert wird. In Zusammenarbeit mit den USA (*MIT*), Japan (Universität Tokio), Schweiz (*EPFL*, *ETHZ*) und verschiedenen chinesischen Forschungspartnern untersucht das *PSI* Optionen für eine nachhaltigere Stromerzeugung. Der Bereich Nukleare Energie und Sicherheit (*NES*) im *PSI* ist für einen grösseren Teil des Programms verantwortlich. Dabei werden Lebenszyklusanalysen durchgeführt. Auswirkungen auf die Umwelt

und externe Kosten werden abgeschätzt, ebenso wie die verschiedenen Risiken. Der Bereich Allgemeine Energie (ENE) modelliert die Zusammenhänge von Energie und Wirtschaft.

Für die Abschätzung der externen Kosten für Gesundheit und Umwelt, die durch die Luftverschmutzung aus normalem Betrieb der verschiedenen *Energieketten* entstehen wurde der *sorg*.

impact pathway approach verwendet. Zusätzlich wurden Ökosysteme mit dem Modell *RAINS-Asia* (Regional Air Pollution Information and Simulation) studiert. Während sich die detaillierten Analysen im Stromsektor auf die chinesische Provinz Shandong konzentrierten, erstreckte sich das modellierte Gebiet über grosse Teile Asiens. Einige bedeutungsvolle Resultate konnten für ganz China abgeleitet werden.



Figur 1: Kosten/Nutzen-Analyse von zwei ausgewählten Szenarien für die Stromerzeugung in der Provinz Shandong im Jahr 2020; Szenario 1 (oben): konventionelle Kohleverstromung bei Einsatz von Filtern (Coal, FGD); Szenario 2 (unten): Verbesserungen der bestehenden Stromerzeugungstechnik, saubere fortgeschrittene Kohletechnologie sowie der Einsatz von Kernenergie und Erdgas (Clean Coal Technology + Diversification).

Die Abschätzungen zeigen, dass an jedem einzelnen Tag eine Million Menschen vorzeitig wegen der Luftverschmutzung sterben. Ausserdem sind derzeitig 25% von ganz China einem hohen Risiko durch Übersäuerung von Luft und Boden ausgesetzt. Bei dem vorliegenden starken Wunsch nach Wachstum dürften diese Zahlen noch ansteigen, wenn zu geringe Anstrengungen bei der Überwachung der Luftverschmutzung unternommen werden. Eine verbesserte Luftüberwachung dürfte das Risiko aber im betroffenen Gebiet um bis zu 15% senken helfen. Die durch Luftverschmutzung verursachten Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt korrespondieren mit dem chinesischen Bruttosozialprodukt von 6% bis 7%. Die Energieerzeugung in China trägt zu einem Viertel der gesamten

Kosten durch die Luftverschmutzung bei; allein 20% davon werden durch den Energiesektor in der Provinz Shandong verursacht.

Es wurden kosteneffiziente Strategien überlegt, die zu einer Reduktion der Emissionen von Luftschadstoffen und Treibhausgasen führen können. Figur 1 zeigt die Ergebnisse einer Kosten/Nutzen-Analyse von zwei ausgewählten Szenarien für die Stromerzeugung in der Provinz Shandong im Jahr 2020. Das erste Szenarium beruht auf konventioneller Kohleverstromung bei Einsatz von Filtern (Coal, FGD). Beim zweiten Szenarium (Clean Coal Technology + Diversification) wurden Verbesserungen der bestehenden Stromerzeugungstechnik unterstellt, wie Ausserbetriebnahme zu umweltfeindlicher Anlagen, Nachbesserungen an Anlagen und Filtern, Koh-

lebehandlung. Im zweiten Szenarium wurde ausserdem eine saubere fortgeschrittene Kohle-technologie sowie der Einsatz von Kernenergie und Erdgas angenommen. Beiden Szenarien ist eine moderate Zunahme an elektrischer Energie um den Faktor 3 in den kommenden 20 Jahren unterlegt. Eines der Ergebnisse, die man aus der

Abbildung ablesen kann ist die Tatsache, dass die Gesamtkosten (interne und externe Kosten) einer viel umweltfreundlicheren Strategie niedriger sind als die Kosten einer vermeintlichen *schmutzigen*, nicht nachhaltigen Energiestrategie.

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), Studsvik (SE), Framatome-ANP (FR/DE), Scandpower (NO).
- **LWR-Kontamination:** IAEA, VGB (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 -/IEA, IAEA, ABB-CETP (CH), MIT (US); Univ. of Tokio (JP).

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Unter den internationalen Entwicklungen, die das vergangene Jahr ausgezeichnet haben, ist eine von besonderer Wichtigkeit für die Kernenergie allgemein und für die Kernenergieforschung in der Schweiz insbesondere, nämlich die Implementierung des *Generation IV International Forum (GIF)* als wichtiges Element der *Generation IV NPP Initiative* (s. Überblicksprogramm 2000). *GIF* soll die bilaterale und multilaterale Kollaboration zur Entwicklung nuklearer Energiesysteme unterstützen. Eine formale Charta wurde von den Regierungen von Argentinien, Brasilien, Kanada, Frankreich, Japan, der Republik Korea, Grossbritannien und den USA unterzeichnet, die den Mitgliedsländern den Rahmen für Zusammenarbeit in Forschung und Entwicklung öffnet. Um sicherzustellen, dass *GIF* auch die Meinungen von Ländern zur Kenntnis nimmt, welche die Charta nicht unterzeichnet haben, nehmen Beobachter von Euratom, der *IAEA* und der *OECD/NEA* an allen Besprechungen teil. Jedes Mitgliedsland hat Experten nominiert, die

in den Technischen Arbeitsgruppen an der Erstellung zukünftiger F&E-Programme (R&D Roadmaps) mitwirken. Die Schweiz wurde von den USA eingeladen, *GIF* beizutreten. Nach reiflicher Abwägung kam die Schweizer Regierung zum Schluss, dass die Schweiz an den Zielen von *GIF* interessiert ist und dass sie die Forderungen der Charta erfüllen wird. Die Schweiz will aktiv über die am *PSI* laufenden Forschungsarbeiten im Rahmen von *GIF* kooperieren. Nach einer Vernehmlassung bei den bisherigen Mitgliedsländern wurde der Mitgliedschaft der Schweiz zugestimmt. Die *GIF* Charter kann Anfang 2002 von der Schweiz unterschrieben werden. Forschungsbeiträge des *PSI* könnten auf dem Gebiet der Reaktorphysik (*PROTEUS*), der Thermohydraulik (*PANDALINX*) und des Material- und Brennstoffverhaltens (Hot-Zellen) liegen.

Ein grosser Teil der Arbeiten des Jahres 2001 war dem Umbau und der Umrüstung des Hot-Labors gewidmet. Die Arbeit wird im Frühjahr 2002

beendet sein, so dass alle Laboratorien wieder in Betrieb genommen werden können. Der Zustand wird voll den gegenwärtigen Sicherheitsbestimmungen gerecht werden, so dass die Labors für die nächsten 5 bis 10 Jahre allen Anforderungen genügen können sollten.

Es war entschieden worden, das Forschungsprojekt *Fortgeschrittene Brennstoffzyklen*, insbesondere die Herstellung actinidenhaltiger Brennstoffproben, abzuschliessen. Wegen der Sanierung des Hot-Labors konnten die Arbeiten nicht im geplanten Umfang weitergeführt werden. Da aber vertragliche Verpflichtungen (*EU, JNC*) vom *PSI* in jedem Fall eingehalten werden, wird sich der Abschluss der Arbeiten zu *Fortgeschrittene Brennstoffzyklen* auf Mitte 2003 verschieben.

Der *NES* trägt auch in den kommenden Jahren substantiell zur Entwicklung eines Flüssigmetall-

targets für Spallationsquellen bei (Projekt *ME-GAPIE*). Es soll in die *PSI-SINQ* eingebaut und dort getestet werden; es stellt aber auch ein wesentliches Element dar für sog. Accelerator Driven Systems (ADS), etwa zur Actinidentransmutation, in der ferneren Zukunft.

Nach dem positiven Entscheid über Bau und Betrieb der 5. SLS-Strahllinie als EXAFS-Anlage, wurde das entsprechende Design der Strahllinie inzwischen fertiggestellt. Auch die benötigten Komponenten wurden ausgewählt. Anstrengungen waren erforderlich, um die erwartete Wärmebelastung auf den optischen Elementen zu minimieren. Mit der Inbetriebnahme von EXAFS wird im Jahr 2004 gerechnet. Wichtig für den *NES* ist es, dass es möglich sein wird, in der Strahllinie auch geschlossene radioaktive Proben zu untersuchen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

Unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden:

Die Jahresberichte werden auch im Scientific Report 2001/Volume IV des *PSI* erscheinen (zu bestellen bei: *PSI*, CH-5332 Villigen, oder <http://nes.web.psi.ch>).

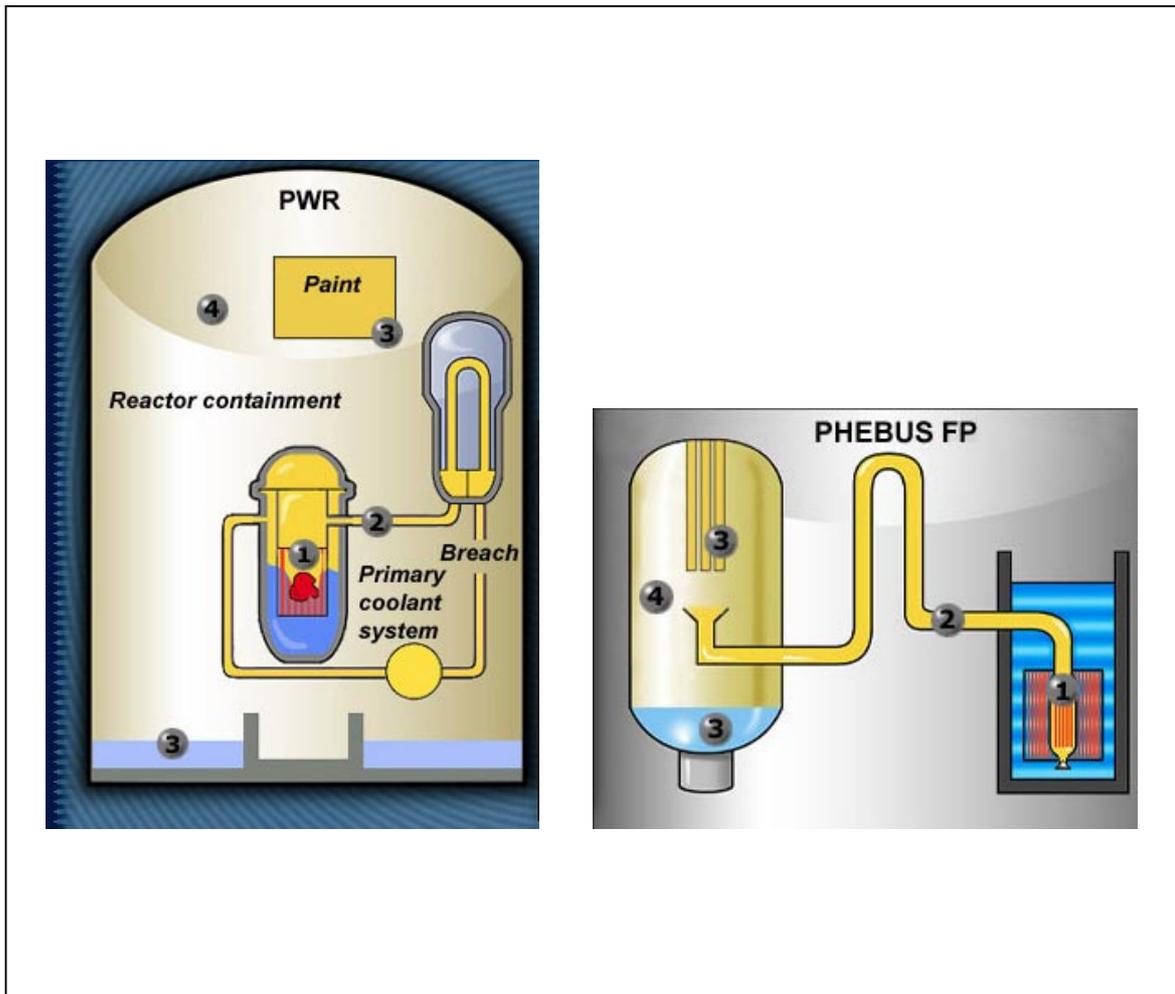
- [1] M. A. Zimmermann (martin.zimmermann@psi.ch), *PSI*, Villigen, **Sicherheitsforschung bezüglich Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz**, <http://stars.web.psi.ch> (JB)
- [2] V. N. Dang (vinh.dang@psi.ch), *PSI*, Villigen, **Human Reliability Analysis (HRA) applications and methods development**, <http://systemsweb.psi.ch/hra> (JB)
- [3] F. Jatuff (fabian.jatuff@psi.ch), *PSI*, Villigen, **LWR-PROTHEUS**, <http://proteus.web.psi.ch> (JB)
- [4] A. Hiltpold: (werner.hiltpold@psi.ch), *PSI*, Villigen, **LWR-Kontamination**, (SB)
- [5] W. Hoffelner (wolfgang.hoffelner@psi.ch), *PSI*, Villigen, **EDEN**, <http://lww.web.psi.ch/eden0.htm> (JB)
- [6] D. Kalkhof, M. Grosse, M. Niffenegger, B. Tirbonod (dietmar.kalkhof@psi.ch), *PSI*, Villigen, **Früherkennung von Ermüdungsschädigung an Kernkraftwerkskomponenten**, <http://lww.web.psi.ch/lwi0.htm> (JB)
- [7] S. Güntay (salih.suentay@psi.ch), *PSI*, Villigen, **Forschung zu schweren Unfällen**, <http://sacre.web.psi.ch> (JB)
- [8] J. Hadermann (joerg.hadermann@psi.ch), *PSI*, Villigen, **Entsorgung radioaktiver Abfälle**, <http://les.web.psi.ch/groups/index.html> (JB)
- [9] Ch. Hellwig (christian.hellwig@psi.ch), *PSI*, Villigen, **Fortgeschrittene Brennstoffzyklen**, <http://lww.web.psi.ch/afcpj.htm> (JB)
- [10] M. Huggenberger, J. Dreier, F. de Cachard (max.huggenberger@psi.ch), *PSI*, Villigen, **ALPHA**, <http://lth.web.psi.ch/LTH.htm> (JB)
- [11] St. Hirschberg (stefan.hirschberg@psi.ch), *PSI*, Villigen, **GaBE**, <http://gabe.web.psi.ch> (JB)

REGULATORISCHE SICHERHEITSFORSCHUNG

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2001

Marianne Zünd

marianne.zuend@hsk.psi.ch



PHEBUS Fission Products Programme

Am Forschungsreaktor PHEBUS kann das Verhalten von Spaltprodukten bei Störfällen analysiert werden.

Links: **Druckwasserreaktor(PWR)** - Prinzipschema / Rechts: **PHEBUS FP** - Schema der **Ver-suchsanlage**

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die nukleare Sicherheit ist heute mehr denn je ein zentrales Thema. Einerseits hat sich die öffentliche Diskussion über die Sicherheit der schweizerischen Kernanlagen unter dem Eindruck der Terroranschläge auf New York und Washington vom 11. September 2001 verschärft. Andererseits müssen technische Sicherheitsfragen im Zusammenhang mit der Liberalisierung im Energiesektor gelöst werden: Erhöhungen der Leistung und der Verfügbarkeit, der Langzeitbetrieb bestehender Reaktoren und die damit verbundene komplexe Alterungsproblematik sowie der rentabilitätsorientierte Abbau beim Betriebspersonal können sicherheitsrelevante Konsequenzen nach sich ziehen. Der regulatorischen Sicherheitsforschung kommt in diesem Umfeld eine entscheidende Rolle zu. Sie muss der ständigen Zunahme des technischen Wissens und der Erweiterung der Fachgebiete Rechnung tragen. Sie ist damit ein wesentliches Element für den Ausbau der Kenntnisse und Kompetenz sowie für die Weiterentwicklung der Methoden, Entscheidungsgrundlagen und Arbeitsmittel der Aufsichtsbehörde aber auch der Betreiber.

Die Projekte der regulatorischen Sicherheitsforschung bilden die wissenschaftliche Basis für die unabhängige Überprüfung der nuklearen Sicherheit und des Strahlenschutzes nach dem aktuellsten Stand von Wissenschaft und Technik. Die Forschungsarbeiten tragen dazu bei, dass die schweizerischen Kernanlagen auch in Zukunft unter Gewährleistung höchster Sicherheitsstandards betrieben werden können. Die Resultate der Forschungsprojekte fliessen deshalb direkt in die Weiterentwicklung der Standards und Vorschriften zugunsten der nuklearen Sicherheit ein.

Die Forschungsaktivitäten des Programms Regulatorische Sicherheitsforschung zeichnen sich durch ihre langjährige thematische Kontinuität und ihre zunehmende internationale Vernetzung aus. Sie konzentrieren sich gemäss dem Energieforschungskonzept des Bundes auf die folgenden Gebiete:

Materialforschung: Die technische Alterung an Maschinen, Komponenten und Material, überholte Anlagenkonzepte und Anlagendokumentationen beeinflussen mit zunehmendem Anlagenalter die Betriebssicherheit.

Stör- und Unfallforschung: Massnahmen für die Prävention sowie die Verminderung der Auswirkungen von Stör- und Unfällen bedingen eine tiefgreifende Kenntnis der auslösenden Faktoren und der Vorgänge im Ereignisfall. Diese äusserst aufwändigen Projekte werden vorwiegend in internationalen Grossprojekten und Kooperationen bearbeitet.

Human Factor Forschung: Informationstechnologien, neue Instrumente, Kontroll- und Kommunikationsmethoden, Simulationen und Modelle tragen zum Verständnis menschlicher (Fehl-)Handlungen bei und können entscheidende Impulse zur Verbesserung der Sicherheit und Zuverlässigkeit im Kernkraftwerkbetrieb liefern.

Strahlenschutz- und Notfallschutz-Forschung: Für die Gewährleistung eines qualitativ hochstehenden Strahlen- und Notfallschutzes müssen die Messmethoden, Instrumente und die Methoden der Datenauswertung laufend weiterentwickelt werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

MATERIALFORSCHUNG

RIKORR - Risskorrosion in druckführenden ferritischen Komponenten des Primärkreislaufes von SWR [1]: Alterungsphänomene des Materials wie Ermüdung, Strahlenversprödung und Risskorrosion können bei zunehmender Betriebsdauer von Kernkraftwerken die Gewährleistung der Betriebssicherheit beeinträchtigen. Das Projekt **RIKORR** befasst sich mit den Bedingungen, die zur Rissbildung führen können und untersucht im Speziellen die Risskorrosion

im ferritischen Reaktordruckbehälter von Siedewasserreaktoren (SWR) und ihren Einfluss auf die Strukturintegrität des Behälters.

Im Berichtsjahr 2001 wurden vom *Paul Scherrer Institut* Studien zum Rissverhalten bei Schwingungen sowie unter stationären und transienten Lastbedingungen (z.B. beim An- und Abfahren des Kraftwerks oder bei Laständerungen) durchgeführt. Beobachtet wurde ebenfalls das Verhalten der Risse in den sensiblen Bereichen der Wärmeeinflusszone und der Schweissnaht des

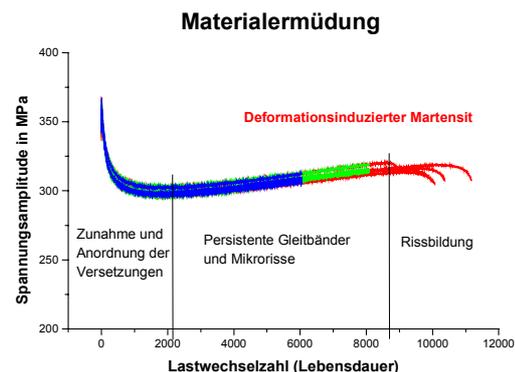
Reaktordruckbehälters. Die erarbeiteten Resultate erlauben die Identifizierung von kritischen Komponenten und Betriebszuständen, welche in den geltenden Regelwerken (ASME-Codes) zur Ermüdungsauslegung und Ermüdungsüberwachung von Reaktordruckbehältern noch nicht berücksichtigt sind. Das Projekt wird Ende 2002 mit der Ausarbeitung von Schlussfolgerungen und Empfehlungen bezüglich der Regelwerke für den Siedewasserreaktorbetrieb abgeschlossen.

KOKORR – Kontaminations- und Korrosionskontrolle im Primärkreislauf von Kernkraftwerken [2]: Im Projekt **KOKORR** untersucht das *Paul Scherrer Institut* die Rolle der Wasserchemie bei der Aktivitätsaufnahme (Kontaminationsmechanismen) und dem Alterungsverhalten von Anlagenkomponenten aus rostfreiem CrNi-Stahl.

Im Jahr 2001 wurden Experimente zur Normal-Wasserchemie und zur Wasserstoff-Wasserchemie an Materialproben mit dünnen Edelmetallbeschichtungen (z.B. Platin) durchgeführt. Diese Beschichtungen sollen die Risskorrosions-Anfälligkeit vermindern. Die Fahrweise mit unterschiedlicher Wasserchemie (variierende H_2/O_2 – Verhältnisse im Reaktorwasser) beeinflusst das elektrochemische Potential der Oberflächenbeschichtung und dadurch auch den Prozess der Aktivitätsadsorption. Mit Hilfe der thermodynamischen Modellierung der Oxidbildung auf rostfreiem Stahl konnte zudem ein Ansatz gefunden werden, der die Vorausberechnung von Oxidbildungen für verschiedene Wasserqualitäten und die quantitative Bestimmung von löslichen Verbindungen erlaubt. Die Resultate, die aus der Untersuchung der Diffusion von Kobalt-Ionen in die Korrosionsschichten gewonnen werden konnten, erlauben nun Voraussagen zum Kobalttransport in die Oxide sowie zu deren Beeinflussung durch Zink. Das Projekt, welches zum Jahresende 2001 abgeschlossen wurde, leistet einen wesentlichen Beitrag dazu, die Auswirkungen von Wasserchemieveränderungen im Reaktorwasser auf die Kontaminationsmechanismen besser beurteilen zu können.

FEVER – Früherkennung von Ermüdungsschädigung von Kernkraftwerkskomponenten [3]: Alterungsprozesse in druckführenden Komponenten von Kernreaktoren können die Anlagensicherheit massgeblich beeinträchtigen. Solche Komponenten unterstehen daher einer strengen, periodischen Prüfung. Ziel des Projektes **FEVER** ist es, Methoden für die Früherkennung und Überwachung von Werkstoffalte-

rungsprozessen auf Ebene der Mikrostruktur zu entwickeln, so dass Schädigungen bereits vor der makroskopisch sichtbaren Rissbildung entdeckt werden können. Mit Hilfe der Werkstoffdiagnostik können die Zusammenhänge zwischen alterungsspezifischen Veränderungen der Mikrostruktur und den mechanischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Stahls definiert werden (s. Fig.1). Konkret werden Veränderungen der Mikrostrukturen untersucht, wie sie bei der Ermüdung von austenitischem Stahl von Primärkreis-Rohrleitungen entstehen. Bei mechanischer Belastung kann bei diesem Stahl eine Umwandlung der Austenitstruktur zur ferromagnetischen Martensit-Kristallgitterstruktur beobachtet werden. Mit einem Neutronendiffraktometer lässt sich der absolute Martensitgehalt bestimmen und zur Kalibrierung der magnetischen Messgrößen heranziehen. Mit den magnetischen SQUID- und GMR-Messtechniken können sodann die Schwellenwerte von Ermüdungserscheinungen bestimmt werden.



Figur 1 : Spannungsamplituden-Lastwechselzahl-Kurven mit der Unterteilung in Versetzungsanordnung, Sättigung und Anrissbildung bei Frequenz 1 Hz und Temperatur 70 °C

Im Jahr 2001 wurden die Einflussgrößen auf die durch Deformation induzierte Martensitbildung identifiziert und charakterisiert sowie geeignete magnetische Kenngrößen und Messtechniken für die Martensitgehaltbestimmung ausgewählt. Das Projekt wird Mitte 2002 abgeschlossen. Im Nachfolgeprojekt sollen Konzepte für die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in die Prüfpraxis der Kernkraftwerke erarbeitet werden.

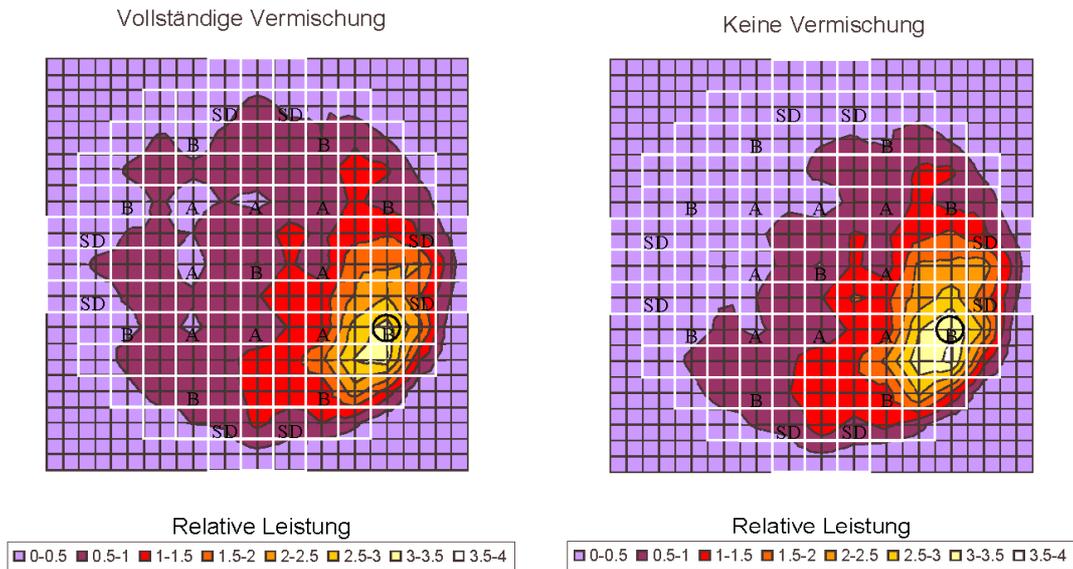
STÖR- UND UNFALLFORSCHUNG

STARS – Sicherheitsforschung bezüglich Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz [4]: Das Projekt **STARS** verfolgt seit mehreren Jahren das Ziel, die erforderliche Expertise für die Durchführung von deterministischen Sicherheitsanalysen zur Überprüfung des Brennstoff- und Anlageverhaltens aufzubauen sowie die notwendigen Rechenprogramme und Modelle bereitzustellen und zu validieren. Die Modellierungen und Validierungen sind Basis für die wissenschaftlichen Dienstleistungen, die das *Paul Scherrer Institut* im Rahmen von sogenannten *on-call* Experten-Aufträgen (z.B. für Störfallanalysen) für die

HSK und die Kraftwerksbetreiber durchführt. Im Jahr 2001 wurde der Aufbau eines zertifizierbaren Qualitätsmanagement Systems und eines elektronischen Archivs lanciert, um die Funktion des Projektes als Expertenorganisation weiter zu konsolidieren. Mit der laufenden Weiterentwicklung der Analysemethodik auf den neusten Stand von Wissenschaft und Technik und durch die enge Zusammenarbeit mit Behördenvertre-

tern und Betreibern gewährleistet STARS ein motivierendes Arbeitsumfeld für alle Projektmitarbeiter und trägt auf diesem Weg zum Erhalt der wissenschaftlichen Kompetenz auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit bei.

Ein weiterer wichtiger Meilenstein des Jahres 2001 war die Einführung von dreidimensionalen Reaktorkern-Modellen in die transiente Systemanalyse, die eine realistische (best-estimate) Berechnung der Interaktionen zwischen Kernverhalten und Anlagendynamik ermöglicht (s. Fig. 2). Jedes Brennelement des Reaktorkerns kann in der Simulation nun auch thermohydraulisch einzeln dargestellt werden. Mit der Teilnahme am internationalen Peach Bottom Turbine Trip Benchmark, einem Projekt der *OECD-NEA*, wird diese neue Analysetechnik auch für Siedewasserreaktoren ausgetestet. Die Code-Validierung bildet ebenfalls eine wichtige Basis für die Projektarbeit: so soll die Beteiligung am internationalen LOCA-Validierungsprojekt für den *TRAC-BF1* Code zu einer verbesserten Absicherung der Siedewasser-Reaktor-LOCA-Analyse (LOCA = Loss Of Coolant Accident) beitragen.



Figur 2: Leistungsverteilung zum Zeitpunkt der Leistungsmaximums nach Dampfleitungsbruch in einem Druckwasserreaktor. Das linke Diagramm zeigt die Leistungsverteilung unter der Annahme einer vollständigen Vermischung im unteren Plenum, das rechte Diagramm zeigt die Leistungsverteilung bei Vernachlässigung der Vermischung im unteren Plenum.

PHEBUS Fission Products Programme [5]: 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 *Institut de Protection et de Sûreté*

Nucléaire (IPSN) 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*

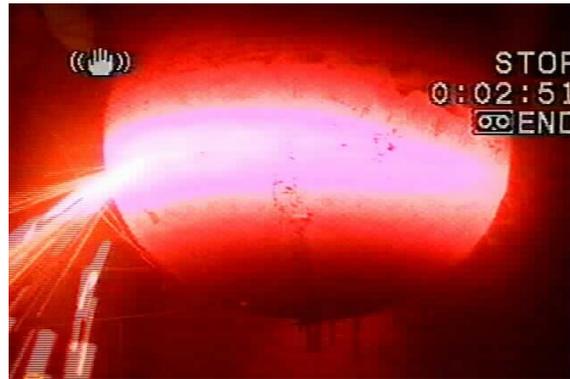
Institut, Bereich Nukleare Energien und Sicherheit, konzentrieren sich auf die Untersuchung der Spaltproduktfreisetzung mittels Nachbestrahlungsuntersuchungen und Post-Test-Analysen sowie auf Studien zum Verhalten des Jods im Reaktorsicherheitsbehälter.

Im Jahr 2001 wurden die Arbeiten zur Stabilität von Silber-Jodid abgeschlossen. Sie zeigen, dass Ansäuerungen und Verunreinigungen durch Luftradiolyse- oder Kabelpyrolyseprodukte zu einer erhöhten Jod-Freisetzung führen können, bzw. dass das Jod in alkalischen wässrigen Lösungen im Reaktorsicherheitsbehälter zurückgehalten wird. Im Rahmen der Post-Test-Analyse des Versuchs FPT-4 wurden Aerosole an Filterproben durch Elektronenstrahl-Mikroanalyse charakterisiert. Die Bestimmung der abgeschiedenen Brennstoffkomponenten, Spaltprodukte und Strukturmaterialien erfolgt im Jahr 2002.

Die Arbeiten zur weitergehenden Auswertung der Resultate zur Code-Modellierung und zur Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse aus PHEBUS fliessen einerseits in das Forschungsprogramm des Bereichs Nukleare Energie und Sicherheit des PSI ein, werden aber auch in internationalen Validierungs- und Standardisierungsprojekten weiterbearbeitet.

MSWI - Melt-Structure-Water Interactions during severe accidents in LWRs [6]: Das Programm **MSWI** wird vom schwedischen [Royal Institute of Technology](#) durchgeführt. Neben der Schweiz treten als weitere Partner die amerikanische [U.S. Nuclear Regulatory Commission \(US-NRC\)](#) und die schwedische (SKI) Sicherheitsbehörde sowie schwedische und finnische Kraftwerksbetreiber auf.

Schwerpunktmässig wurden im Jahr 2001 die Bedingungen untersucht, welche die Fragmentierung der in Wasser eintauchenden Schmelze bestimmen. Weitere Studien betrafen die Schmelzeverteilung und Kühlung im Containment, die Kühlbarkeit der Schmelze ausserhalb des Behälters und die thermische und mechanische Belastung des Druckbehälters durch die Schmelze (s. Fig. 3). Die meisten Teilprojekte des Jahres 2000 wurden weitergeführt und lieferten wichtige Erkenntnisse zu Phänomenen, die während schweren Unfällen auftreten können. Die Resultate werden für die Risikoquantifizierung verwendet, die beim Entscheid für technische Nachrüstungen und bei der Optimierung von Unfallstrategien und Notfallplanungen eine Rolle spielen.



Figur 3: Druckbehälter während des Störfalls

Halden Reactor Project – Fuels & Materials

[7]: Das [OECD Halden Reaktor-Projekt](#) ist das grösste Gemeinschaftsprojekt der [OECD](#) und bildet mit rund 100 Teilnehmern aus 20 Ländern ein wichtiges, internationales Netzwerk in den Bereichen Brennstoffe, Werkstoffe, Kraftwerkbetrieb sowie menschliche Faktoren. Das aktuelle Programm läuft Ende 2002 aus; der Programm-vorschlag für die Jahre 2003 - 2005 liegt vor.

Das Arbeitsprogramm im Gebiet *Brennstoffe & Materialien* umfasst die Analyse der Brennstoff-sicherheit bei hohem Abbrand unter normalen und transienten Betriebsbedingungen. Als Ver-wender von MOX Brennstoffen sind für die Schweizer Kernkraftwerke insbesondere die Bestrahlungsversuche mit MOX Brennstoff (Uran-Plutonium-Mischoxid) und uranfreiem IMF Brennstoff (Inert-Matrix Fuel) von grosser Relevanz. Bei den Werkstoffen stehen Untersuchungen zu altersbedingten Qualitätsminderungen im Vordergrund. Aus den Resultaten können Kriterien sowohl für den zukünftigen Einsatz der Brennstoffe und Materialien als auch für die Sicherheitsbestimmungen abgeleitet werden.

Zum Brennstoff- und Materialverhalten wurden im Haldenreaktor im Jahr 2001 total 14 Experimente durchgeführt. Obwohl die Verfügbarkeit des Reaktors wegen eines Schadens an einem Brennelement zu Beginn des Jahres eingeschränkt war, konnten mehrere neue Experimente erstmals geladen werden. In den Experimenten wurden keramische Brennstoffe (UO₂, MOX, inert matrix) und Hüllrohrmaterialien bezüglich ihres Betriebsverhaltens untersucht, wobei typische Messgrössen die Brennstofftemperatur, die Spaltgasfreisetzung und Dimensionsänderungen von Brennstoff und Hüllrohr sind. Im IMF Experiment, für welches das *Paul Scherrer Institut* den Brennstoff produziert hat, wurde eine Leistungserhöhung durchgeführt und die Spaltgasfreiset-

zung aus diesem innovativen Brennstoff gemessen. Weiterhin wurden für Reaktorstrukturen verwendete rostfreie Stähle bezüglich Risswachstum unter Bestrahlung sowie strahlungsinduzierten Veränderungen der Eigenschaften untersucht. Hier konnten erstmals Erkenntnisse zum Risswachstum unter Druckwasserreaktorbedingungen für Stähle mit hohen Neutronenfluenzen gewonnen werden.

Severe Accident Research Programme (US-NRC) [8]: In den USA werden seit Jahren wichtige Projekte im Bereich der schweren Unfallforschung durchgeführt. Durch die vertiefte Analyse schwerer Unfälle können deren Auswirkungen detailliert ermittelt werden und die Möglichkeiten der Minderung der Unfallfolgen durch Massnahmen im Bereich der Infrastruktur und des Unfallmanagements bewertet werden. Die Schweiz beteiligt sich im Rahmen eines Abkommens mit der amerikanischen Sicherheitsbehörde **US-NRC** an einigen dieser Forschungsvorhaben:

- COOPRA (Cooperative Probabilistic Risk Assessment Research): Zusammenarbeit und Austausch von Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der Probabilistischen Sicherheitsanalyse.
- CSARP (Cooperative Severe Accident Research Programme): Erforschung von Brennstoffschäden, Spaltproduktfreisetzung und Containmentbelastung und Verbesserung des Codes *MELCOR* zur Simulation der Abläufe bei schwere Unfällen.
- Aging related research: Untersuchung von Alterungseffekten auf Material und Komponenten.
- Safety Research on Deregulation: Untersuchung der Auswirkungen der Marktderegulierung auf die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Kernkraftwerken.

Im Jahr 2001 wurden mehrere Studien im Bereich der Materialalterung durchgeführt, die zu neuen Erkenntnissen im Bereich der umweltbedingten Phänomene (Temperatur, Wasserchemie) und im Bereich der strahleninduzierten Veränderungen führten. Des Weiteren konnten mehrere Workshops durchgeführt werden, bei welchen die zukünftigen Schwerpunkte der schweren Unfallforschung diskutiert wurden. Im Herbst 2002 wird die HSK Gastgeberin eines weiteren Workshops zum Thema *Safety Research on Deregulation* sein.

HUMAN FACTOR FORSCHUNG

HRA - Human Reliability Analysis [9]: Die HRA ist ein Bestandteil der modernen probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA). Sie bezweckt die Untersuchung der menschlichen Handlungen, die für den Ablauf eines Stör- oder Unfalls relevant sind und berechnet die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Fehlhandlungen.

Die Projektarbeit konzentrierte sich im Jahr 2001 auf die Erarbeitung von Schlussfolgerungen aus der Pilotstudie *Errors of Commission* (EOCs). EOCs sind Handlungen, welche Störfallsituationen potentiell verschlechtern. Damit solche EOCs in den probabilistischen Sicherheitsanalysen berücksichtigt werden können, müssen sie zuerst sicher identifiziert werden. Dazu gehört das grundlegende Verständnis von Situationen bzw. Szenarien, die zu Fehlhandlungen führen. Das Projekt liefert in diesem Bereich wichtige Beiträge zur Weiterentwicklung von Methoden zur Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit innerhalb der PSA.

Halden Reactor Project – Man-Machine Interactions [7, Teil 2]: Der sichere Betrieb von Kernkraftwerken hängt wesentlich von den Handlungen der Operateure ab. Sie müssen jederzeit über die relevanten Informationen zum Betriebszustand verfügen, diese korrekt interpretieren und sodann effektiv und korrekt auf die aktuelle Situation reagieren. Erfahrungen aus Störfällen zeigen, dass diese oft aufgrund von Schwächen beim Zusammenspiel von Betriebspersonal, Technologie und Organisation aufgetreten sind. Ziel der Experimente dieses Teilbereichs des Halden Projektes ist deshalb die Optimierung des Systems MTO (Mensch-Technologie-Organisation).

Im Bereich *man-machine systems research* und speziell im HAMMLAB (Kommandoraum-Simulator) wurden im Jahr 2001 empirische Untersuchungen zum Zusammenspiel zwischen Operateuren und Kontroll- und Überwachungssystemen durchgeführt, um die Auswirkung von neuer Technologie, Betriebsprozeduren und Arbeitsmethoden auf die Sicherheit zu erfassen. Studiert wurde die Frage, wie ein teilweiser Ausfall von Systemen zur Informationsvermittlung das Verhalten und die Leistung der Operateure beeinflusst und welche Faktoren zur Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit wesentlich sind. Weiter wurde ein verbessertes System zur rechnergestützten Darstellung und Wartung von Prozeduren bereitgestellt.

STRAHLENSCHUTZ- UND NOTFALLSCHUTZ-FORSCHUNG

Zusammenarbeit in der Dosimetrie [10]: Die von der HSK beaufsichtigten Institutionen sind dazu verpflichtet, Inkorporationen durch Triage-Messeinrichtungen für Schilddrüsen und Thorax zu überwachen. Für die technische Überprüfung dieser Einrichtungen, führte das *Paul Scherrer Institut* im Rahmen des Projektes **Zusammenarbeit in der Dosimetrie** im Jahr 2001 Kalibrierungen der Messsysteme bei den schweizerischen Kernkraftwerken durch. Durch die Standardisierung der Kalibrier- und Prüfmethodik gelang es, die Vergleichbarkeit von Triage-Messresultaten und die Rückverfolgbarkeit herzustellen. Zudem konnten wertvolle Hinweise zur Messmethodik mit einem in der Handhabung komplexen Messgerätetyp gegeben und damit die Qualität der Messresultate gesichert werden. Weiter wurde die Mess- und Auswertemethodik zur indirekten Bestimmung von Oberflächenkontaminationen untersucht. Die neu erarbeiteten Protokolle zu Messverfahren und standardisierten Gerätekalibrierungen gewährleisten die erforderliche hohe Qualität der Messresultate. Im Berichtsjahr konnten zudem durch die Teilnahme am EU-Projekt EVIDOS wertvolle Erkenntnisse im Bereich der Neutronendosimetrie gewonnen werden.

Zusammenarbeit in der Radioanalytik [11]: Das Projekt **Zusammenarbeit in der Radioanalytik** umfasst die Entwicklung und Optimierung von radiochemischen Analyseverfahren für die Bestimmung von Spezialnukliden (Plutonium, Americium, Curium, etc.) in Umweltproben für die Immissionsüberwachung sowie in Urin- und Stuhlproben für die Inkorporationsüberwachung von strahlenexponierten Personen. Im Jahr 2001 konzentrierten sich die Arbeiten des *Paul Scherrer Instituts* auf die Weiterentwicklung und Implementierung von radiochemischen Methoden: 1) für die Überwachung von Bodenproben in der Umgebung der ZWILAG AG und des *Paul Scherrer Instituts*; 2) für die Bestimmung von ^{14}C in Blättern von Bäumen in der Umgebung der Kernkraftwerke; 3) für die Bestimmung von Aktiniden in Urin- und Stuhlproben von strahlenexponierten Personen und 4) für die rasche Bestimmung von Aktiniden in Luftfiltern von Gebäuden und Verbrennungsanlagen.

Ergänzt wurden die Projektarbeiten des Jahres 2001 durch Routineanalysen für die Kernkraftwerke, welche die Bestimmung von ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{242}Cm et ^{244}Cm im Reaktorwasser

und die Bestimmung von Gammastrahlern im Abwasser der Reaktoren beinhaltet.

Molekularbiologische Untersuchungen zur zellulären Radiosensitivität [12]: Das Wachstum der meisten Tumoren ist abhängig von der Blutversorgung. Kann diese durch Erhöhung der Strahlensensitivität der Zellen der Tumorblutgefäße unterbrochen werden, könnte die Wirksamkeit der Strahlentherapie bei niedrigeren Dosen und geringeren Nebenwirkungen verbessert werden.

Das Ziel des Projektes **Molekularbiologische Untersuchungen zur zellulären Radiosensitivität** ist die Entwicklung eines strahleninduzierbaren Gens. Durch die selektive Aktivierung einzelner Gene über eine durch Strahlung aktivierbare Reguliersequenz (Promotor) auf der DNS, kann die Expression und Sekretion von toxischem Protein in bestrahlten Zellen ausgelöst werden. Dieses giftige Protein schädigt das Gewebe lokal und soll damit die Radiotherapie von Tumoren unterstützen. Langfristig kann auf diese Weise eine kombinierte Gen- und Strahlentherapie entwickelt werden. Das Projekt liefert einen Beitrag zum Grundlagenwissen im Strahlenschutz bzw. der biologischen Wirkungsweise ionisierender Strahlung.

Im Jahr 2001 konnte das *Paul Scherrer Institut* zwar ein Promotor definieren, allerdings liessen sich die Bedingungen nicht so reproduzieren, dass eine regelmässige Induktion erfolgt wäre. Die Arbeiten wurden deshalb auf die Analyse eines weiteren Promotors fokussiert, von dem eine besser reproduzierbare Induktion erwartet wird. Parallel dazu wird die Expression einer Reihe von Genen untersucht, um weitere geeignete Promoterkandidaten zu identifizieren.

Die Rolle von Glutathion-S-Transferasen bei der Reparatur von strahleninduzierten Zellschäden [13]: Das Verständnis der molekularen Mechanismen, die einer Zelle ermöglichen durch ionisierende Strahlen entstandene Schäden zu erkennen und zu reparieren, ist von grundlegender Bedeutung bei der Evaluation von Strahlenschäden in lebenden Organismen. In diesem Projekt untersucht das *Paul Scherrer Institut* die **Rolle von Glutathion-S-Transferasen bei der Reparatur von strahleninduzierten Zellschäden** mit dem Ziel, die Radiosensitivität der Endothelzellen von sich neu bildenden Tumorblutgefässen zu untersuchen. In den ersten Experimenten konnte gezeigt werden, dass die Überexpression verschiedener Glutathion-S-

Transferasen (GST) in Zellen deren Strahlentoleranz erhöht und sie vor dem Zelltod schützen kann. GST sind multifunktionelle Enzyme, die bei der Detoxifikation (Entgiftung) der Zellen eine wichtige Rolle spielen. Die Resultate zeigen, dass die GST bei den Mechanismen, die zur Strahlenresistenz eines Tumors führen, eingreifen. Eine Behandlung mit GST-Inhibitoren als Begleitmassnahme bei der Krebstherapie könnte vielleicht in Zukunft eine vielversprechende Strategie in der Krebsbekämpfung darstellen.

Methodische Weiterentwicklungen in der Aeroradiometrie [14]: Die Aeroradiometrie ist ein wichtiges Element der schweizerischen Notfallorganisation und wird unter der Leitung der NAZ (Nationale Alarmzentrale) in jährlichen Übungen operativ eingesetzt. Aeroradiometrische Messungen liefern wichtige Informationen über das Ausmass von radioaktiven Kontaminationen der Umwelt bei Unfällen oder bei radiologischen Störfällen. Die im Projekt **Methodische Weiterentwicklungen in der Aeroradiometrie** entwickelten Erweiterungen und Verbesserungen der Aerogammaspektrometrie-Messsysteme erlauben neben der schnelleren Verfügbarkeit von präzisen Resultaten auch die internationale Vergleichbarkeit der Daten. Durch die Teilnahme der Schweiz am EU-Projekt ECCOMAGS, die im Rahmen dieses Projektes ermöglicht wurde, konnte die Zusammenarbeit mit dem Schwedischen Strahlenschutzinstitut (SSI) weitergeführt und vertieft werden.

Die Messflüge des Jahres 2001 unter der Leitung der Nationalen Alarmzentrale wurden durchgeführt. Erstmals wurden Profile der Dosisleistung durch die ganze Schweiz vermessen. Die Resultate zeigten eine gute Übereinstimmung mit Bo-

denmessungen und auch mit der aus unabhängigen Daten entstandenen Dosisleistungskarte der Schweiz. Im Verlaufe des Jahres wurde ein Konzept für die Erneuerung der Messsysteme ausgearbeitet, welches den Ersatz der veralteten Rechner beinhaltet. Im Zuge dieser Erneuerung soll auch die neu entwickelte Software für die Auswertung im Messsystem integriert werden. Diese ermöglicht die automatische on-line Auswertung durch eine der von den Messstationen übertragenen Daten, so dass sie in Notfallsituationen sehr schnell verfügbar sind. Das Projekt wurde im Jahr 2001 abgeschlossen. Die Arbeiten sollen in einem Folgeprojekt im operativen Bereich weitergeführt werden.

PALEOSEIS – Reconstructing the paleoseismological record in Northern Switzerland [15]: Im Projekt **PALEOSEIS** wird ein Katalog über starke Erdbeben vom Spätpleistozän (ab ca. 14'000 v. Chr.) bis heute erstellt. Die Untersuchungen konzentrieren sich dabei auf die Region Basel und die Umgebung von Luzern. Mit sedimentologischen Untersuchungen der jüngsten geologischen Formationen (aktive Bruchzonen, Seesedimente) und durch die Beobachtung von Erdbebenschäden an Tropfsteinen in Höhlen werden Hinweise auf Starkbeben gesucht. Ergänzt werden diese Studien durch die Datierung von Felssturzereignissen in der Region Basel.

Das Projekt leistet mit der Erweiterung der bestehenden Daten einen bedeutenden Beitrag bei der laufenden Neubewertung der seismischen Gefährdung der schweizerischen Kernanlagen (Projekt PEGASOS des Unterausschusses Kernenergie UAK der Überlandwerke) und kann auch für andere sensible Infrastrukturanlagen von grosser Bedeutung sein.

Nationale Zusammenarbeit

Auf nationaler Ebene war die Zusammenarbeit aller relevanten Institutionen der nuklearen Sicherheit sehr intensiv. Im Rahmen der laufenden Projekte fanden regelmässig Beratungen mit der HSK statt. Daneben wurde der Informationsaustausch mit den Kernkraftwerken, den Schweizer Forschungsteams im Bereich der Nuklearforschung und privaten Firmen gepflegt. Diese Arbeitskontakte trugen dazu bei, Schlussfolgerungen für weitergehende Arbeiten bzw. für die Umsetzung der Resultate in die Sicherheits- und Aufsichtspraxis zu gewinnen.

Neben dem [Paul Scherrer Institut](#) als Kompetenzzentrum für die nukleare Sicherheitsforschung in der Schweiz, erfolgt in diesem Programm eine enge Zusammenarbeit mit den folgenden weiteren Institutionen: [Nationale Alarmzentrale \(NAZ\)](#), [Sektion für die Überwachung der Radioaktivität \(SUER\)](#) in Fribourg, [Institut Universitaire de Radiophysique Appliquée \(IRA\)](#), [Universität Bern](#), [Universität Fribourg](#), [ETH Zürich](#), [EPF Lausanne](#), [Functional Genomics Center der Universität Zürich](#), [Institut Suisse de Recherche Expérimentale sur le Cancer \(ISREC\)](#).

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 [4]: 5. EU-Rahmenprogramm, EURATOM, Nr. [FIKS-2000-00041](#), NACUSP – Natural circulation and stability performance of BWRs

PHEBUS FP [5]: 5. EU-Rahmenprogramm, EURATOM, Nr. [FIKS-1999-00009](#), PHEBEN-2 – Validating of severe accident codes against PHEBUS FP for plant applications

PHEBUS FP [5]: 5. EU-Rahmenprogramm, EURATOM, Nr. [FIKS-1999-00008](#), ICHEMM – Iodine chemistry and mitigation methods

Zusammenarbeit in der Dosimetrie [10]: 5. EU-Rahmenprogramm, EURATOM, Nr. [FIKR-2001-00175](#), EVIDOS – Evaluation of individual

dosimetry in mixed neutron and photon radiation fields

Methodische Weiterentwicklungen in der Aeroradiometrie [14]: 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 [5]
- MSWI - Melt-Structure-Water Interactions during severe accidents in LWRs [6]
- Halden Reactor Project [7]
- Severe Accident Research Programme (US-NRC) [8]

Weitere internationale Kooperationen im Rahmen von Forschungsprojekten, internationalen Organisationen und Standardisierungsaktivitäten können den einzelnen Projektberichten entnommen werden.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Die Ziele und Termine der Forschungsprojekte wurden im Jahr 2001 weitgehend eingehalten, und es konnten wichtige Erkenntnisse und ansprechende Resultate erzielt werden. Ausserordentlich offen und kooperativ gestalteten sich die Arbeitsbeziehungen innerhalb der einzelnen Projekte und im Gesamtrahmen des Programms. Der Transfer der wissenschaftlichen Ergebnisse in die operativen Bereiche und umgekehrt konnte somit jederzeit reibungslos erfolgen. Ebenfalls ausgebaut und gefestigt wurden die internationalen Kontakte, die infolge der knapper werdenden Ressourcen zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Auch die neuen Forschungsprojekte des Jahres 2002 werden sich inhaltlich an den einleitend beschriebenen Forschungsschwerpunkten orientieren. Im Zeichen der Kontinuität der Forschung werden einige Nachfolgeprojekte in Angriff genommen, die auf den zuvor erarbeiteten Resultaten basieren. Diese Programmstrategie gewährleistet eine klare, zweckorientierte und ausgeglichene Fokussierung des Programms auf aktuelle Forschungsgebiete.

Exzellente Forschung kann nur dann durchgeführt werden, wenn die Bedingungen für den Aufbau eines hochqualifizierten wissenschaftlichen und technischen Nachwuchses geschaffen werden können. Insofern trägt das Programm auch Verantwortung dafür, die Attraktivität des Forschungsgebiets zu erhalten bzw. zu erhöhen. Dazu muss es die Möglichkeit der Bearbeitung von spannenden Forschungsthemen bieten. Erreicht wird dies durch die Aufnahme neuer Forschungsthemen, die sich durch das veränderte wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Umfeld sowie durch die zunehmende globale Vernetzung der nuklearen Sicherheitsforschung entwickeln. Einige dieser Themen, wie die risiko-informierte Aufsicht, die Auswirkungen der Marktliberalisierung, die Definition der sogenannten Safety Performance Indicators aber auch Strategien zum Wissensmanagement in der nuklearen Sicherheitsforschung werden bereits jetzt intensiv in internationalen Arbeitsgruppen diskutiert.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

- [1] H. P. Seifert, S. Ritter, U. Ineichen, U. Tschanz (hans-peter.seifert@psi.ch), Paul Scherrer Institut, *Villigen*, **Risskorrosion in druckführenden ferritischen Komponenten des Primärkreislaufs von SWR** (JB)
- [2] I. Mailand, M. Nicolet, B. Gerodetti (irene.mailand@psi.ch), PSI, *Villigen*, **Kontaminations- und Korrosionskontrolle im Primärkreislauf von Kernkraftwerken** (SB)
- [3] D. Kalkhof, M. Grosse, M. Niffenegger, B. Tirbonod (dietmar.kalkhof@psi.ch), PSI, *Villigen*, **Früherkennung von Ermüdungsschädigung an Kernkraftwerkskomponenten** (JB)
- [4] M. A. Zimmermann (martin.zimmermann@psi.ch), PSI, *Villigen*, **Sicherheitsforschung bezüglich Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz** (JB)
- [5] H. Bruchertseifer, D. Gavillet, S. Güntay, Z. Kopajtic (horst.bruchertseifer@psi.ch), PSI, *Villigen*, **PHEBUS Fission Product Programme, Schweizer in-kind Beiträge** (JB)
- [6] B. R. Sehgal, Z. L. Yang, H. S. Park, A. Karbojian, A. Giri, M. J. Konovalikhin, A. Gubaidullin, D. Paladino, A. Theerthan (sehgal@ne.kth.se), Royal Institut of technology, Nuclear Power Safety Division, Stockholm, Sweden, **Melt-Structure-Water interactions during severe accidents in LWRs** (JB)
- [7] 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)
- [8] A. Szukiewicz, A. Malliakos, A. Thadani, E. Hackett, J. Rosenthal, J. Persensky, J. Vora, M. Cunningham, N. Chokshi, N. Siu, R. Zimmerman, S. Basu (ajs2@nrc.gov), US Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C., USA, **Severe Accident Research - Co-operative Research Activities US-NRC & HSK** (JB)
- [9] V. N. Dang (vinh.dang@psi.ch), PSI, *Villigen*, **Human Reliability Analysis (HRA) applications and methods development** (JB)
- [10] Ch. Schuler, M. Boschung, C. Wernli (christoph.schuler@psi.ch), PSI, *Villigen*, **Zusammenarbeit in der Dosimetrie** (JB)
- [11] S. Bajo, J. Eikenberg (sixto.bajo@psi.ch), PSI, *Villigen*, **Zusammenarbeit in der Radioanalytik** (SB)
- [12] R. Jaussi (rolf.jaussi@psi.ch), PSI, *Villigen*, **Molekularbiologische Untersuchungen zur zellulären Radiosensitivität** (JB)
- [13] K. Ballmer-Hofer, I. Skaanes, S. Suarez (kurt.ballmer@psi.ch), PSI, *Villigen*, **Die Rolle von Glutathion-S-Transferasen bei der Reparatur von strahleninduzierten Zellschäden** (JB)
- [14] B. Bucher, L. Rybach (benno.bucher@psi.ch), PSI, *Villigen*, **Methodische Weiterentwicklungen in der Aeroradiometrie** (JB)
- [15] A. Becker, D. Giardini (becker@seismo.ifg.ethz.ch), ETH Zürich, Institut für Geophysik, *Zürich*, **Reconstructing the paleoseismological record in Northern Switzerland** (JB)

FUSION THERMONUCLEAIRE CONTROLEE

Rapport de synthèse pour le programme de recherche 2001

Jean-François Conscience

jean-francois.conscience@bbw.admin.ch



L'installation de chauffage du TCV par ondes cyclotron-électroniques

Située à côté du tokamak, cette installation comporte six gyrotrons à 83 GHz de 500 kW chacun (surmontés d'un élément jaune sur l'illustration) et trois gyrotrons à 118 GHz, également de 500 kW chacun.

Centres de gravité du programme et buts fixés

La fusion thermonucléaire nous est familière en tant que source d'énergie du Soleil et des étoiles. Aussi, qu'est-ce qui empêche de l'exploiter sur Terre ? Depuis longtemps, la réponse est connue des physiciens: « Rien... en principe ». L'un des combustibles nécessaires, le deutérium (^2H) est présent dans l'eau de mer en quantité pratiquement illimitée. L'autre, le tritium (^3H) ne se trouve pas dans la nature, mais peut être produit, dans le réacteur de fusion, par transmutation du lithium, un élément qui se trouve en abondance dans la croûte terrestre. Enfin, la fusion de noyaux atomiques légers ne produit pas d'isotopes à longue durée de vie, contrairement à la fission de noyaux lourds. Certes l'irradiation des parois du réacteur par les neutrons issus de la fusion peut rendre la structure du réacteur radioactive, mais il est possible de maîtriser ce problème en choisissant des matériaux dits à *basse activation*.

Cependant, les conditions à atteindre pour que la fusion des noyaux de deutérium et de tritium se produise sont telles (température de 50 MK, entre autres) que le contrôle de cette réaction s'est avéré extrêmement difficile à obtenir. Après une phase initiale (1960-1980) de recherche dans des laboratoires nationaux avec des instruments de dimensions modestes, la recherche s'est focalisée, dans les années 1980 et 1990 autour de quelques grandes installations aux USA, au Japon et, surtout, en Europe avec le JET (*Joint European Torus*). La prochaine étape, ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), multipliera par 10 l'énergie qu'on lui fournira pour amorcer et entretenir la réaction de fusion. Elle permettra de finaliser le concept du premier prototype de centrale électrique, DEMO, qui ouvrira la voie à la première généra-

tion de réacteurs commerciaux. En parallèle, la recherche pour identifier et développer des matériaux à basse activation se poursuivra et aura besoin, elle aussi, d'une grande installation, IFMIF (*International Fusion Materials Irradiation Facility*). Le chemin est donc encore long (et coûteux!) et, selon le scénario généralement accepté aujourd'hui, le but de la première centrale commerciale, après DEMO, ne devrait être atteint que dans une cinquantaine d'années.

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 (EUR-ATOM), dont notre Pays est membre de plein droit. Financées par le Conseil des Écoles polytechniques, le Fonds national suisse et l'Union Européenne, elles sont effectuées, pour l'essentiel, au Centre de recherche en physique des plasmas (CRPP) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 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 soussigné jean-francois.conscience@bbw.admin.ch.

Travaux effectués et résultats acquis en 2001

L'ESSENTIEL EN BREF...

- Le 21 juillet 2001, neuf ans de planification, d'étude et de réorientation ont abouti à la publication d'un rapport final sur le concept d'ITER. Ce rapport contient tous les éléments nécessaires à l'Union Européenne, au Japon, à la Russie et au Canada pour entamer maintenant les négociations finales sur la construction d'ITER et son exploitation.
- À l'occasion d'une réunion quadripartite de négociations à Moscou en juin 2001, le Canada a officiellement proposé à ses partenaires un site pour ITER à Clarington dans la grande banlieue de Toronto. En Europe, la France a proposé à l'Union Européenne le site de Cadarache, en Provence, alors qu'un autre site, proposé par l'Espagne, fait encore l'objet d'études préliminaires.

- Le Conseil des ministres de l'Union Européenne, le 10 décembre 2001, a décidé d'attribuer une somme de 750 M € (millions d'euros) à la fusion dans le prochain 6^e Programme-cadre (2003-2006) et de réserver, sur ce montant, 200 M € pour ITER ; cette décision confirme officiellement le rôle important que l'Europe entend jouer dans ITER, et les discussions qui l'ont entourée ont mis en évidence un très large soutien politique en faveur de la fusion ; en revanche, elle entraîne une diminution des sommes disponibles pour soutenir les laboratoires nationaux associés au programme *Fusion* d'EURATOM.
- Mandaté par la Présidence du Conseil de la recherche de l'UE, un groupe de travail est arrivé à la conclusion qu'il serait possible de développer la fusion thermonucléaire contrôlée comme source d'énergie électrique en vingt ou trente ans, au lieu de cinquante, en intensifiant les efforts de recherche.
- Le 14 décembre 2001, le Conseil du JET s'est réuni pour la dernière fois dans le but de dissoudre *l'entreprise commune (JET Joint Undertaking)* qui avait géré la grande installation européenne pendant plus de vingt ans ; mais l'exploitation de cette dernière se poursuit dans le cadre de l'EFDA (*European Fusion Development Agreement*)...
- Au CRPP de l'EPFL, l'installation de l'infrastructure de chauffage du TCV (*Tokamak à Configuration Variable*) s'est achevée ; ce qui fait que l'installation est maintenant prête à fonctionner à pleine puissance, au service de l'Association Suisse/EURATOM et de l'ensemble du programme *Fusion* d'EURATOM.
- Le gyrotron de 140 GHz, développé pour le *Stellarator W7X* de Greifswald (D) par le CRPP, en collaboration avec d'autres laboratoires européens et l'industrie, a atteint des valeurs records en puissance (1 MW) et en impulsion (jusqu'à 1 seconde).
- À l'Université de Bâle, l'équipe du professeur Oelhafen a procédé à l'étude la plus complète à ce jour de la distribution du bore à l'intérieur d'un réacteur de fusion, en analysant des tuiles de carbone exposées au plasma du TCV.

ITER

Le 21 juillet 2001, le *Final Design Report* (FDR) d'un ITER redimensionné a été publié. Il forme la base technique pour les négociations finales en cours entre l'Union Européenne, le Canada, le Japon et la Russie afin de définir la structure légale d'ITER, le programme de sa construction et son exploitation. L'installation sera capable de produire 500 MW d'énergie de fusion pendant quelque 400 secondes et amplifiera ainsi d'un facteur 10 l'énergie qu'il faudra lui fournir pour amorcer et entretenir les réactions de fusion. Le FDR permet aussi de mieux évaluer les coûts du projet. La construction durera huit à dix ans et reviendra à environ 3,5 G € (milliards d'euros). Il faudra ensuite compter avec 240 M€ par année pour l'exploitation pendant dix à vingt ans.

À ce jour, seul le Canada a offert officiellement un site pour ITER, Clarington dans la grande banlieue de Toronto. La France a proposé à l'Union Européenne le site de Cadarache, près d'Aix-en-Provence, où se trouvent déjà des installations de recherche nucléaire françaises, mais, l'Espagne ayant aussi manifesté son intérêt, l'Europe devra d'abord faire un choix chez elle avant de proposer officiellement un site à ses partenaires internationaux. Enfin, on attend toujours également une offre japonaise.

L'Union Européenne participe pleinement aux travaux préparatoires d'ITER, grâce à une équipe technique localisée à Garching, près de Munich, comptant 13 collaborateurs, dont un Suisse. Le lancement d'activités industrielles d'importance est imminent ; ce qui a incité le CRPP et l'OFES à organiser à Berne, en décembre 2001, une journée d'information pour l'industrie suisse.

COOPERATION EUROPEENNE 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 au projet 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 M€. Le 10 décembre 2001, le Conseil des ministres de l'Union Européenne a décidé d'attribuer 750 M€ à la fusion dans le 6^e Programme-cadre (2003-2006) et de réserver, sur cette somme, 200 M€ pour la participation européenne à ITER. Cette décision entérine la volonté de l'Europe de jouer un rôle important dans ce grand projet international et elle reflète aussi le large soutien politique dont jouit actuellement la fusion sur le vieux continent. En revanche, elle correspond à une diminution sensible des sommes que le programme *Fusion* d'EURATOM peut mettre à disposition des laboratoires qui lui sont associés ; et 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.

Le regain d'intérêt actuel pour la fusion a incité la Présidence belge du Conseil de la recherche de l'UE à mandater un groupe de travail pour étudier une possibilité d'accélérer la recherche en matière de fusion thermonucléaire contrôlée. La réponse est claire : oui, l'exploitation de la fusion pourrait devenir une réalité plus rapidement, mais à condition de construire ITER sans délai et d'intensifier en parallèle la recherche sur les matériaux. On arriverait ainsi à un réacteur commercial dans 20 ou 30 ans. Ces conclusions (connues sous le titre de *fast track fusion*) suscitent actuellement un très grand intérêt dans de nombreux pays.

La gestion du programme *Fusion* d'EURATOM s'inscrit aujourd'hui dans le cadre de l'EFDA (*European Fusion Development Agreement*). Au-delà des activités générales rappelées ci-dessus, les responsables de la Commission européenne se soucient aussi beaucoup des aspects socio-économiques, sécuritaires et environnementaux de la fusion et ont engagé de nombreuses études sur ces questions (*Socio-Economic Research on Fusion - SERF 1 & 2, Safety and Environmental Aspects of Fusion Power - SEAFP 1 & 2*). L'une d'entre elles, qui se propose d'examiner la perception des risques, réels ou théoriques, liés à ITER dans la population de Cadarache, sera coordonnée par le CEPE (*Centre for Energy Policy and Economics*) de l'EPFZ.

Au chapitre des grandes installations, le JET continue de jouer un rôle unique, malgré la dissolution définitive, le 14 décembre 2001, de l'entité légale, l'entreprise commune JET (*JET Joint Undertaking*), qui l'a géré pendant plus de vingt ans. Son exploitation se poursuit dans le cadre

de l'EFDA ; l'intérêt des laboratoires européens associés au programme *Fusion* à utiliser l'installation JET ne faiblit pas et elle continue d'être un banc d'essai privilégié pour les technologies nécessaires à ITER.

EURATOM ET LA SUISSE

L'Accord de coopération entre la Confédération suisse et EURATOM, signé le 20 mars 1979, est un accord-cadre de durée illimitée. Sous son égide, des contrats et des accords plus détaillés, comme, par exemple, l'EFDA, fixent les modalités de cette coopération. En 2001, aucun de ces accords et contrats ne devaient être renouvelés et c'est donc dans un contexte juridique et financier stable que les activités se sont poursuivies. La contribution annuelle de la Suisse au programme *Fusion* d'EURATOM se monte à quelque 10 MCHF, en chiffres ronds.

LE CRPP : L'ASSOCIATION SUISSE • EURATOM

Les recherches du CRPP en matière de fusion thermonucléaire contrôlée portent, d'une part, sur la physique du *Tokamak*, la théorie et la simulation numérique à l'EPFL et, d'autre part, sur la supraconductivité et les matériaux au PSI.¹

Le TCV (*Tokamak* à Configuration Variable) est la grosse installation à disposition du CRPP à l'EPF de Lausanne. Elle présente la propriété unique au monde de pouvoir produire des plasmas de formes différentes ; ce qui s'avère essentiel pour vérifier les simulations numériques et planifier la géométrie optimale du cœur des futures centrales thermonucléaires. En 2001, l'installation de l'infrastructure de chauffage du TCV par ondes cyclotron-électroniques (gyrotrons) s'est achevée (voir la photographie de la page de titre) et l'instrument est maintenant capable de fonctionner à plein rendement. Le CRPP s'est fait un nom dans ces systèmes de chauffage et, en collaboration avec d'autres laboratoires et avec l'industrie, développe des gyrotrons pour d'autres organisations. En 2001, un instrument de 140 GHz, construit pour une installation allemande de recherche en fusion, a atteint des valeurs records en puissance (1 MW) et en impulsion (jusqu'à 10 secondes). Enfin, le CRPP compte parmi les laboratoires européens utilisateurs du JET (en particulier pour l'étude du plasma du bord, des phénomènes magnéto-hydrodynamiques et du contrôle du plasma) et il participe au projet ITER

(étude du contrôle du plasma et de l'antenne pour lancer les ondes cyclotron-électroniques).

Dans le domaine de la supraconductivité, le rôle unique de l'installation SULTAN au PSI s'est traduit par une utilisation exclusive de cet instrument en 2001 pour tester les câbles supraconducteurs destinés aux installations de fusion thermonucléaire. Parmi les nombreuses activités de l'année, on notera la construction et la vérification d'une paire d'amenées de courant à

80'000 A pour l'installation allemande Toska, où se déroulent les essais de la bobine toroïdale d'ITER, un autre exemple de la participation suisse, via EURATOM, au développement de cette prochaine installation.

Enfin, les études de matériaux à basse activation se sont poursuivies sur l'installation PIREX, également au PSI. Elles portent sur des alliages de titane (en collaboration avec Sulzer Innotec) et d'acier ferritique-martensitique.

Collaboration nationale

À l'Institut de physique de l'Université de Bâle, le groupe du professeur Oelhafen étudie les propriétés de surface des matériaux qui, dans une installation de fusion, sont exposés au plasma [1]. Une collaboration étroite est établie depuis plusieurs années avec le CRPP. Des tuiles de carbone placées à l'intérieur du TCV sont analysées à Bâle en vue de comprendre les phénomènes qui ont lieu durant les décharges de plasma (érosion, re-déposition, libération d'impuretés). En 2001, l'analyse d'un nombre élevé d'échantillons de graphite boronisé provenant de

différentes régions du TCV a été possible, fournissant ainsi, pour la première fois, une vue particulièrement complète de la distribution du bore sur toute la surface du réacteur. À côté de ce travail lié au TCV, les travaux ont porté sur les couches de carbone amorphe contenant du lithium, matériaux qui pourraient être intéressants comme interface entre le plasma et la paroi. La structure de telles couches a été mise en évidence par spectroscopie photoélectronique.

Collaboration internationale

COLLABORATION DANS LE CADRE DE L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE (AIE)

Le programme de l'AIE (organe autonome de l'OCDE) en fusion nucléaire est étroitement coordonné avec les programmes de recherche nationaux et avec d'autres programmes internationaux, y compris le programme *Fusion* d'EURATOM. Les Accords d'exécution (*Implementing Agreements • IA*) permettent de réaliser des activités de R&D, en exploitant efficacement le savoir combiné d'experts et en évitant des duplications inutiles. Huit IA sont actuellement en cours d'exécution. Ils couvrent des thèmes divers liés à la physique des plasmas, aux matériaux et aux aspects socio-économiques de la fusion. EURATOM participe à tous ces Accords d'exécution et les chercheurs suisses sont directement impliqués dans deux d'entre eux, l'un concernant la recherche sur les matériaux, l'autre étudiant les échan-

ges de chaleur entre le plasma et la paroi du réacteur. L'un de ces IA, 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 (*International Fusion Materials Irradiation Facility*) qui est tout aussi incontournable qu'ITER dans la quête du contrôle de la fusion thermonucléaire.

AUTRES ASPECTS INTERNATIONAUX

Officiellement, les États-Unis ont continué de rester à l'écart du projet ITER, dont ils s'étaient retirés en 1999. Officieusement, toutefois, depuis le changement d'Administration, on note un net regain d'intérêt et il semble de plus en plus vraisemblable qu'ils adopteront ici la même stratégie qu'ils ont suivie au CERN pour le LHC (*Large Hadron Collider*) : laisser les autres prendre la décision formelle puis, une fois cette étape cruciale franchie, rejoindre le projet.

Liste des projets de R+D

(RA) Rapport annuel 2001 existant

les rapports peuvent être téléchargés à partir du site Internet donné

- [1] P. Oelhafen, (peter.oelhafen@unibas.ch; <http://monet.unibas.ch/oelhafen/>), M. Töwe, *Institut für Physik der Universität Basel: **Surface studies related to fusion reactor materials.*** (RA).

Remerciements

L'auteur remercie le professeur Minj 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.

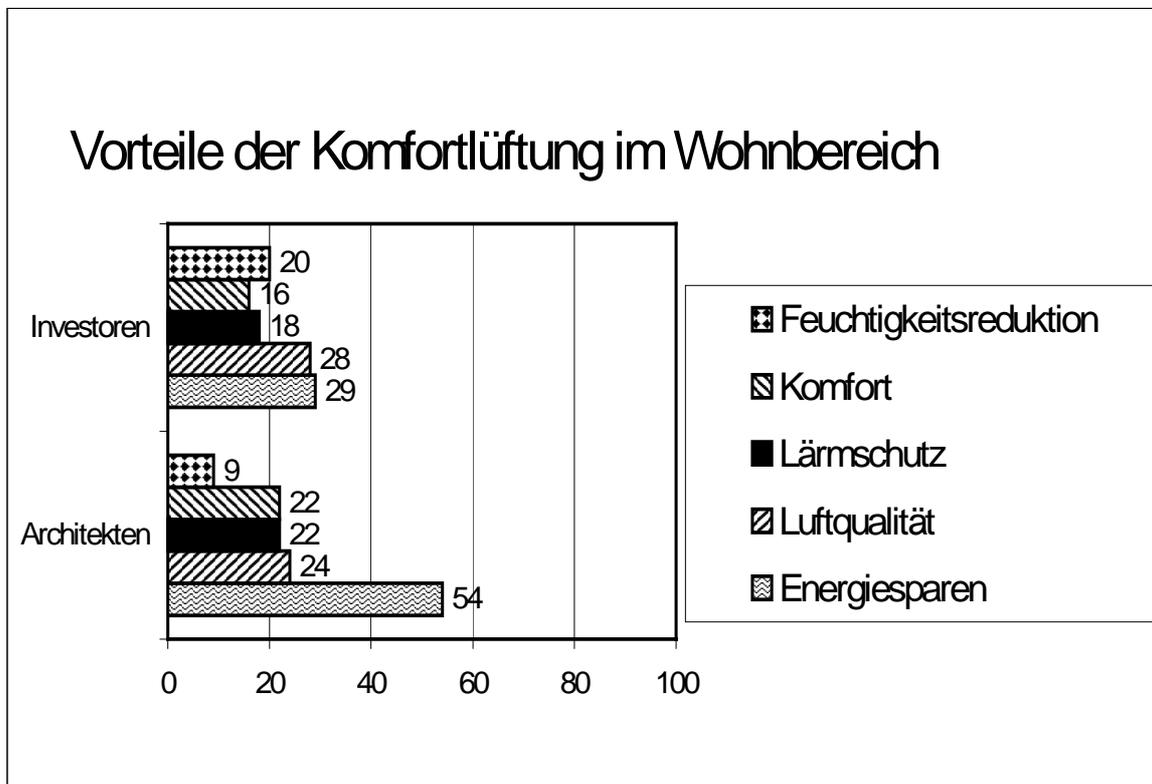
ⁱ Les personnes qui désirent plus de détails sur les recherches du CRPP peuvent commander le [Rapport annuel](#) que publie cette institution (crpp@epfl.ch ; <http://crppwww.epfl.ch>).

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2001

Dr. Ruedi Meier

ruedimeier@bluewin.ch; www.ewg-bfe.ch



Die Komfortlüftung im Wohnbereich

Laut einer Umfrage weist die Komfortlüftung sowohl bei Mietern wie bei Fachleuten eine hohe Akzeptanz auf. Der Aspekt des Energiesparens im Zusammenhang mit der Komfortlüftung hat für Architekten eine grössere Bedeutung als für Investoren (Quelle: [7]).

Programmschwerpunkte

Die Eidgenössische Energieforschungskommission (CORE) hat das Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen (EWG) des Bundesamts für Energie (BFE) als einen wichtigen Schwerpunktbereich bezeichnet. Das Forschungsprogramm EWG beschäftigt sich primär mit den wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Fragen des Energieangebotes und der Energienachfrage. Es werden Grundlagen für die Energiepolitik erarbeitet, die als Basis für die Beantwortung von politischen Vorstössen, die Ausarbeitung von Botschaften des Bundesrates sowie der Weiterentwicklung der Energiepolitik dienen. Die Forschungsergebnisse des Forschungsprogramms EWG kommen ebenfalls den Kantonen und verschiedenen Verbänden und Organisationen zugute. Das Programm EWG ist das einzige nicht-technische Forschungsprogramm im Energiebereich, dem eine zentrale Querschnittsfunktion zukommt, indem mit den verschiedenen technischen Bereichen (z.B. rationelle Gebäude- bzw. Elektrizitätsnutzung) intensiv zusammengearbeitet wird. Die energiewirtschaftliche Forschung hat dabei von den technischen Gegebenheiten und Entwicklungstrends auszugehen. Darauf abgestützt **werden zentral die Fragen des Verhaltens von Investoren, Haushalten, Unternehmen aber auch der Akteure der öffentlichen Hand analysiert.**

Im Jahre 2001 standen **Analysen der Kosten und Wirtschaftlichkeit von Energiesystemen, die Untersuchung der Wirkungsweise von Massnahmen sowie vor allem die Erarbeitung für die Marktregelung der leitungsgebundenen Energieträger (Elektrizität, Gas) im Vordergrund.** Im Anschluss an das eidgenössische Elektrizitätsmarktgesetz mussten Grundlagen für die Elektrizitätsmarktverordnung (EMV) erarbeitet werden. Anlässlich einer Tagung im November 2001 konnten im Rahmen einer Fachveranstaltung wichtige Ergebnisse

einer breiten Öffentlichkeit präsentiert werden. Die Nachfrage nach der Tagung war so gross, dass die Veranstaltung im März 2002 wiederholt werden musste.

Die Analyse der Kosten und Wirtschaftlichkeit von Energiesystemen, vor allem aber die Untersuchung der Massnahmen, stützen sich auf das eidgenössische Energiegesetz und das CO₂-Gesetz ab. Es ist eine wichtige Aufgabe des Forschungsprogramms EWG, bereits erzielte Wirkungen qualitativ und quantitativ zu erfassen, vor allem aber auch Vorschläge für Verbesserungen und Effizienzsteigerungen mit neuen Massnahmen – oder im Rahmen des Vollzugs bestehender Massnahmen – zu erarbeiten.

Im Sommer 2001 wurde eine weitere **Ausschreibungsrunde von EWG-Projekten** vorgenommen. Die Ausschreibungen stützten sich dabei auf die laufend zu überarbeitende EWG-Projektliste ab. Im Vorfeld der Ausschreibungen werden die Projektskizzen bei den verschiedenen interessierten Kreisen (z.B. Kantone, Fachverbände, Verwaltungsstellen etc.) in die Vernehmlassung gegeben und diskutiert. Neben der EWG-Begleitgruppe werden die einzelnen Forschungsprojekte in aller Regel von einer Fachgruppe betreut, damit bereits in der Bearbeitungsphase die Interessen und Anliegen von umsetzungsorientierten Akteuren einfließen. Gleichzeitig stellt die Mitwirkung der Arbeitsgruppen ein wichtiges Element der Qualitätssicherung der Forschungsarbeiten dar. In erfreulicher Weise hat sich die Zusammenarbeit des Forschungsprogramms EWG mit der CORE intensiviert. Ein Resultat dieses Zusammenwirkens ist die Ausschreibung einer Machbarkeitsstudie für ein Forschungsprojekt zur langfristigen nachhaltigen Gestaltung der schweizerischen Energienutzung und Energieversorgung im Rahmen der Ausschreibungsrunde anfangs 2002.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2001

DATEN

Im Projekt **Indikatoren zu ausgewählten kantonalen Energiemassnahmen** [1] wird bereits zum dritten Mal eine Datenauswertung (nach 1996 und 1998) vorgenommen. Die im Zweijahresturnus erhobenen Daten für die Indikato-

ren liegen nun für das Jahr 2000 vor. Damit sind Entwicklungen seit 1996 für jeden Kanton ablesbar. Neu sind die zertifizierten Minergieflächen in die Auswertung einbezogen worden. Die aufgenommenen Output-Indikatoren für den Informations- und Weiterbildungsbereich der Kantone sind in der vorliegenden Form wenig

befriedigend und führen zu schwer interpretierbaren Ergebnissen. Eine Überprüfung dieser Angaben ist deshalb für die nächste Auswertungsrunde vorzunehmen. Insgesamt kann die Entwicklung der kantonalen Energiepolitik anhand der ausgewählten Indikatoren zu den Energiemassnahmen recht gut verfolgt werden. Dabei ist aber ein direkter Vergleich unter den Kantonen schwierig, da doch die Bedingungen bzw. Voraussetzungen, wie etwa auch die vorhandenen Möglichkeiten und Mittel sehr unterschiedlich sind. Mit den vorgelegten Indikatoren ist einzig ein Monitoring möglich. Aussagen über Ursachen und Wirkungen der kantonalen Energiepolitik können damit nicht vorgenommen werden. Hierzu müssten weiterführende Evaluationen und Erfolgskontrollen realisiert werden.

In der **Vorstudie Energieverbrauch im öffentlichen Verkehr** [2] zeigt sich, dass im Jahre 1999 3,9 TWh/a (10,9 PJ/a) elektrische Energie und 80 PJ/a fossile Energie im öffentlichen Verkehr eingesetzt wurden. Die Energiekosten betragen insgesamt ca. 1,1 Mia. Franken pro Jahr. Die 69 Bahnen der Schweiz (SBB und die Konzessionierten Transportunternehmen (KTU)) benötigen insgesamt 2,1 TWh/a elektrische Energie für 320 Mio. Franken pro Jahr. Bei Energiepreisen von 3 bis 19 Rappen pro kWh Strom beträgt der Mittelwert des Elektrizitätspreises 15,2 Rappen pro kWh. Der spezifische Verbrauch an elektrischer Energie hat sich bei den SBB von 1994 bis 1999 um 9% verringert, wobei allerdings eine bedeutende Erhebungsunschärfe das Ergebnis beeinflussen haben könnte. An den Resultaten erstaunen vor allem die hohen spezifischen Energieverbrauchszahlen der KTU-Bahnen. Grundsätzlich wäre es erwünscht, wenn die bisherigen Arbeiten weiter vertieft werden könnten und eine bessere Aufteilung des Energieverbrauchs auf den Güter- bzw. Personenverkehr sowie den Intercity- bzw. Regionalverkehr vorgenommen werden könnte. Zur Zeit ist eine Weiterführung und Umsetzung der Arbeiten noch offen.

PERSPEKTIVEN

Nach intensiven Arbeiten an den Perspektiven für diverse politische Entscheide (Energiegesetz, CO₂-Abgabegesetz, Energievorlagen, Moratorium- und Atomausstiegsinitiativen) konnten im Jahr 2001 die Modellierungs- und Perspektivarbeiten (vgl. dazu Projekte **Koordination der Modellierungs- und Perspektivarbeiten** [3] sowie **Energieperspektiven – Ex-post-Analy-**

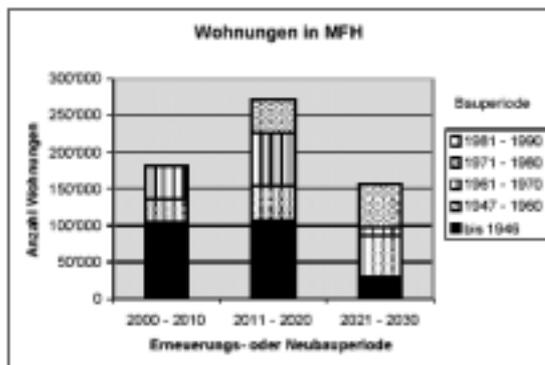
se der Haushalte 2000 [4]) auf ein Minimum konzentriert werden. So sind in internen Berichten die klimabereinigten CO₂-Emissionen für die Jahre 1990 bis 1999 bzw. die Ex-post-Analysen des Energieverbrauchs für 1999/2000 vorgenommen worden. Insgesamt zeigt sich, dass die klimabereinigten CO₂-Emissionen gegenüber den Ist-Werten um rund ±5% abweichen (beispielsweise Ist-Wert 1999: 42,9 Mio. t gegenüber den klimabereinigten Wert von 44,1 Mio. t). Zudem lässt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den statistischen Befunden und den modellmässig ermittelten Verbräuchen feststellen. Ebenfalls zeigen die ersten Resultate des Heizölpanels, dass für die Sektoren Haushalte, Dienstleistungen und Industrie die modellmässig ermittelten Verbräuche mit den tatsächlichen Gesamtansätzen an Heizöl- und den Lagerbestandsveränderungen harmonisieren. Im Bereich der Energieperspektiven sollen im Jahr 2002 wiederum Ex-post-Analysen des Energieverbrauchs vorgenommen werden. Ab Herbst 2002 werden die Energieperspektiven aufgrund von aktualisierten Rahmendaten neu konzipiert und berechnet.

MODELLE

Als Grundlage für die Volksinitiativen *Strom ohne Atom* bzw. *Moratorium plus* sind im Projekt **Ausstieg aus der Kernenergie – wirtschaftliche Auswirkungen** [5] die volkswirtschaftlichen Kosten berechnet worden. Für die Analyse wurde das bestehende dynamische Gleichgewichtsmodell von EcoPlan mit einem Technologiemo- dell im Stromproduktionssektor verknüpft. Der vorzeitige Ausstieg gemäss der Initiative *Strom ohne Atom* würde die Strompreise in der Schweiz um maximal 20% gegenüber der Referenzentwicklung (liberalisierter Strommarkt, Laufzeit der KKW von bis zu 60 Jahren) anheben. Auf die Wirtschaft würde sich dies negativ auswirken, indem das Brutto-Inlandprodukt um rund 0,6% sinken und aufgrund der recht beträchtlichen Strompreiserhöhung ein nicht unerheblicher Strukturwandel in Gang gesetzt würde. Rund 3'500 Arbeitsplätze würden verschwinden. Zudem wäre mit einer Verschlechterung der CO₂-Bilanz zu rechnen, die mit einer CO₂-Abgabe in der Höhe von 40 CHF pro Tonne CO₂ auf Brenn- und Treibstoffen ausgeglichen werden könnte. Das Ausmass der Reduktion der Risikokosten bei einem vorzeitigen Ausstieg aus der Kernenergie ist unklar. Hingegen kann gesagt werden, dass ein Haushalt jährlich mit rund 200 CHF belastet würde, wenn ein vorzeitiger Kernenergieausstieg eingeleitet würde.

KOSTEN/WIRTSCHAFTLICHKEIT UND AKZEPTANZ VON ENERGIESYSTEMEN

Im Projekt *Neu Bauen statt Sanieren* [6] wird einleitend aufgezeigt, dass der schweizerische Mehrfamilienhausbestand vor einem umfassenden Erneuerungs- oder Neubauschub steht. Es wird geschätzt, dass die zu erneuernden bzw. die neu zu bauenden Wohnungen im Jahr 2000 bis 2010 von rund 180'000 auf ca. 270'000 in den Jahren 2011 bis 2020 ansteigen werden (vgl. dazu Figur 1).



Figur 1: Wohnungen in Mehrfamilienhäusern nach Erstellungsperiode, die in den kommenden Dekaden vor einer Gesamterneuerung stehen. (Quelle: [6]).

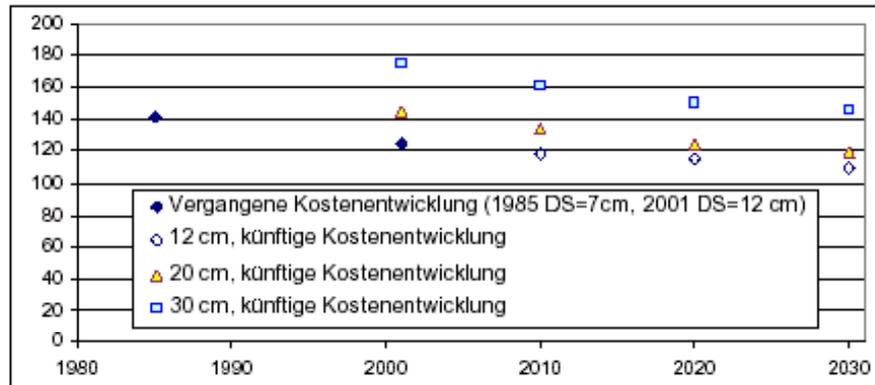
Dabei besteht ein eigentliches Erneuerungsdilemma, da für viele erneuerte oder neu gebaute Objekte eine Bruttorendite von 6,5% bis 7,5% anvisiert wird, die in der Regel aber nur im Raum Zürich oder weiteren grösseren und mittleren Zentren sowie in attraktiven Tourismus-Regionen zu erwirtschaften ist. In der übrigen Schweiz können aufgrund der bestehenden wirtschaftlichen Rahmenbedingungen kaum die notwendigen Erneuerungen bzw. Neubauten rentabel realisiert werden. Es besteht die Gefahr einer eigentlichen Verslumung. Für die Erneuerung spielen dabei energetische Faktoren bestenfalls am Rand eine Rolle. Viel wichtiger sind bautechnische Probleme wie Schallschutz, Ersatz von Leitungen, funktionale und strukturelle Einteilung der Wohnräume, die Realisierung von Ausnutzungsreserven. Bei Gesamtsanierungen können in der Regel nur 50-70% der Investitionen auf die Mietpreise überwältigt werden. Hemmend wirkt zudem, dass die vollständige Leerung eines Objekts zwischen 6 Monaten und 2 Jahren dauern kann. Bei schutzwürdigen Gebäuden kommt ein Ersatzbau in der Regel nicht in Frage. Aus ökologischer Sicht wird festgehalten, dass unter Mitberücksichtigung der grauen Energie ein Ersatzneubau mittel- bis längerfristige Vorteile

aufweisen kann, wobei ein energetischer optimal organisierter Recyclingmarkt dabei eine wichtige Rolle spielt. Kostenmässig sind Ersatzneubauten allerdings bei höherem Wert auch mit höheren Kosten verbunden. Sowohl bei Gesamterneuerungen wie auch bei Ersatzneubauten wird im Prinzip billiger Wohnraum zerstört, was kurz- und mittelfristig sozialpolitischen Sprengstoff beinhaltet. Längerfristig hebt sich der Konflikt tendenziell auf, da teure Wohnungen immer wieder relativ günstiger werden und den Markt preisgünstiger Wohnungen alimentieren. Aus städtebaulicher Sicht ist die umfassende Erneuerung von Wohnraum oder von Ersatzbauten erwünscht, da in Gebieten mit Verslumungstendenzen eine Aufwertung vorgenommen werden kann. Als Instrumente für die Förderung von Ersatzneubauten schlagen die Autoren erhöhte Abschreibungsmöglichkeiten mit der Schaffung von Erneuerungsfonds vor. Zudem könnten Ausnutzungsboni für Ersatzneubauten festgelegt werden. Weiter sollten die Erschliessungsgebühren nur für die Kapazitätserweiterungen und die effektiven Mehraufwendungen erhoben werden. Die Bewilligungsverfahren könnten bei frühzeitiger planerischer Festlegung und Mediationsverfahren erleichtert bzw. beschleunigt werden. Insgesamt sollte das Image von Ersatzneubauten bzw. umfassenden Erneuerungen verbessert werden. Generell plädieren die Autoren dafür, nicht unbedingt die Quantität, sondern die Qualität der Ersatzneubauten als zentrale Steuerungsgrösse ins Auge zu fassen.

Im Projekt *Akzeptanz von Komfortlüftungen im Wohnbereich / Adhérence de l'aération douce dans les logements* [7] geht es um die Analyse der Kenntnisse zur Komfortlüftung und der Akzeptanz bei Fachleuten wie auch bei Wohnungseigentümern sowie Mietern und Mieterinnen. Es zeigt sich, dass bei den Investoren und Architekten die Faktoren Feuchtigkeitsreduktion, Komfort, Lärmschutz, Luftqualität und Energiesparen etwa gleich häufig genannt werden (s. Figur Titelseite). Einzig bei den Architekten weist das Energiesparen ein deutliches Plus auf. In einem weit geringeren Ausmass werden von den gleichen Gruppen Nachteile wie Geräusche, Unterhaltsintensität, zusätzlicher Energieverbrauch, Akzeptanz bei Benutzern genannt. Als zentraler Nachteil von Komfortlüftungen werden erhöhte Kosten hervorgehoben. Von den Mieterinnen und Mietern wird die gute Luftqualität bei einer Komfortlüftung an erster Stelle hervorgehoben. MieterInnen ohne Komfortlüftung erwähnen mögliche Geräusche als

negativ, diejenigen mit Komfortlüftung höhere Kosten als wichtigster Nachteil. Geräusch- und Geruchsbelästigungen werden nur in wenigen Fällen erwähnt. Insgesamt zeigt die Studie, dass

die Komfortlüftung sowohl bei Fachleuten wie auch bei Mieterinnen und Mietern – vor allem jenen mit Erfahrung mit einer Komfortlüftung – eine hohe Akzeptanz aufweist.



Figur 2: Entwicklung der Kosten von Kompaktfassadenwärmedämmungen (Quelle: CEPE 2001)

Im Projekt **Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen** [8] konnten im Berichtsjahr erhebliche Fortschritte erzielt werden. Es wurden die Kosten und Nutzen von Energie-Investitionen im Bereich Wohngebäude (insbesondere Wärmeschutzinvestitionen) und die Funktion der zunehmenden Energieeffizienz für Neubauten, Ein- und Mehrfamilienhäuser berechnet. Ausgehend von den heutigen Energieanforderungen wurden der Minergie- sowie der Passivhausstandard als weitergehende Niveaus analysiert. Die Kosten wurden für einzelne Bauteile (Wand, Dach, Fenster) direkt bei Unternehmen erhoben und die Investitionen mittels der Annuitätsmethode auf Jahreskosten umgerechnet. Den Grenzkosten wurden in einem ersten Schritt die vermiedenen Wärmekosten und in einem weiteren Schritt Zusatznutzen (Co-Benefits) gegenübergestellt. Bei letzteren zeigt sich zur Zeit noch eine recht grosse Unsicherheit. Neben den gegenwärtigen Kosten konnten ebenfalls Schätzungen für die zukünftige Entwicklung unter Einschluss von Lern- und Skaleneffekten vorgenommen werden. Die Autoren halten fest, dass das zu erschliessende Energieeffizienzpotenzial von Wärmeschutzmassnahmen an Gebäuden gross sei, sowohl bei Erneuerungen wie auch bei Neubauten. Dieses Potenzial würde zu einem grossen Teil im Bereich der Wirtschaftlichkeit liegen, dies umso mehr, wenn mögliche Risiken der Energiepreiserhöhungen, der Zusatznutzen bzw. die vermiedenen externen Kosten sowie gesamtwirtschaftliche Beschäftigungseffekte miteinbezogen würden (vgl. Figur 2).

Das Projekt **Erhebung des Erneuerungsverhaltens bei Wohngebäuden** [9] will die Empirie in diesem Sektor deutlich verbessern. So konnten die kantonalen Gebäudeversicherungen bzw. die kantonalen Energiefachstellen (ZH, BE, AG, BL, BS und TG) gewonnen werden, eine breit angelegte Umfrage bei Gebäudeeigentümern zu starten. Die bisherige Auswertung des Pretests für den Kanton Baselland zeigt, dass eine hohe Rücklaufquote von über 50% erreicht werden kann. In praktisch allen Bereichen der Gebäudehülle und bei den Heizanlagen sind in den letzten 15-20 Jahren bei der Hälfte bis beinahe zwei Dritteln Instandsetzungen und Erneuerungen realisiert worden. Der Anteil energetischer Erneuerungen war dabei bei den Fenstern und auch im Dachbereich wesentlich höher als im Wand- und Fassadenbereich, wobei auch bei den letzteren energetische Erneuerungen bei 20-30% vorgenommen wurden.

Das Projekt **Technologie-Monitoring** [10] soll für ausgewählte Technologien Datenreihen über die Entwicklung der Energie-Gestehungskosten erarbeiten. Zudem werden die Gründe für die jeweilige Kostenentwicklung wie auch die Marktpenetration untersucht. Es wird ein systematisches Technologie-Monitoring mit Benchmarking angestrebt, das Grundlagen für strategische Entscheide mit einem möglichst optimalen Mitteleinsatz bereitstellen soll.

Das Projekt **CH-Entwicklung WKK** [11] will die bisherige und zukünftige WKK-Technologie analysieren. Vorliegende WKK-Potentialstudien sollen kritisch analysiert werden und aufgrund

neuer Rahmenbedingungen und technologischen Fortschritten, vor allem bei kleineren WKK-Anlagen (Mikroturbinen, Brennstoffzellen), sind die Potenziale neu zu beurteilen. Die zukünftig wirtschaftliche interessanten Marktbereiche sind zu identifizieren und zu quantifizieren. Verbleibende Realisierungshemmnisse sollen untersucht werden. Die bisherigen Arbeiten zeigen, dass dank der neu verfügbaren Technologien das Potential für WKK-Anlagen deutlich gestiegen ist. Für einzelne Marktsegmente und Grössenklassen wird der Ausschöpfungsgrad als erstaunlich hoch bezeichnet (Klasse für 100 kW_{el}). Es zeigte sich, dass in den letzten 15 Jahren die spezifischen Investitionskosten deutlich reduziert und die Stromkennzahl erhöht werden konnte, was zu einer Verringerung der realen Stromgestehungskosten führte und die Marktchancen verbesserte.

Das Projekt ***Marginale Zahlungsbereitschaft für eine erhöhte Internalisierung des Risikos von Kernkraftwerken*** [12] versucht erstmals, die Risikopräferenzen der Bevölkerung beim Betrieb von Kernkraftwerken zu ermitteln. Inzwischen sind 400 Interviews durchgeführt worden. Die Auswertung ist auf Mitte 2002 zu erwarten. Bei den Schätzungen wurden anspruchsvolle Anforderungen an die Befragten gestellt, die Risikoneigung gegenüber Risiken mit kleinen Wahrscheinlichkeiten und grossen Auswirkungen beurteilen sollten.

MASSNAHMEN

Mit dem Projekt ***Exportförderung im Energiebereich*** [13] sind erstmals die Exportvolumen für energieeffiziente Produkte und Nutzungstechniken erneuerbarer Energien geschätzt worden. Es zeigt sich dabei, dass 1990 ein Volumen im Wert von rund 550 Mio. exportiert worden ist, das bis 1999 auf 800 Mio. CHF angestiegen ist. Dabei nehmen die Effizienzgüter mit gut 700 Mio. CHF einen zehnmal höheren Stellenwert ein als jene für erneuerbare Energien (rund 70 Mio. CHF). Produktbegleitende Dienstleistungen (Planung, Baubetreuung, Inbetriebnahme, Finanzierung, Instandhaltung und Betrieb) für rund 500 Mio. CHF kommen hinzu. Für weitere konstruktive Komponenten wie bei energieeffizienten Anlagen oder Fahrzeugen konnten keine Aufwendungen geschätzt werden. Es ist zu vermuten, dass damit nochmals ein Volumen von mehreren Milliarden Franken hinzukommen würde. Die Schweiz weist im Export im Bereich Energietechnologien bei energierelevanten Messgeräten,

hocheffizienten Elektromotoren, Teilen von Brennern, Gas- sowie Wasserturbinen eine hohe Spezialisierung und damit auch eine gute Wettbewerbsposition auf. Unterdurchschnittlich sind die Wettbewerbspositionen u.a. bei Erzeugnissen zum Wärmetausch, zur Wärmeisolation und Wärmeerzeugung sowie bei Elektromotoren. Der grösste Teil der Exporte geht in die benachbarten westeuropäischen Länder. Die Schweizer Exporte könnten sich bis ins Jahr 2010 auf 1,5 bis 2,3 Mia. Euro verdoppeln oder gar verdreifachen. Die Wachstumsraten hängen entscheidend von der Energiepreisentwicklung und der Klimapolitik ab. Eine klare Dominanz ist dabei bei der Energieeffizienz zu erwarten. Entscheidende Wettbewerbsfaktoren sind der Preis sowie die gesamte Produktequalität. Von beinahe ebenso grosser Bedeutung sind begleitende Dienstleistungen wie Wartung und Instandhaltung sowie die Zusammenarbeit mit Vertriebspartnern. Als Hemmnisse bestehen neben der Währungs- und Lohnpolitik im Inland vor allem die technischen Hemmnisse und die jeweiligen gesetzlichen Vorschriften. Wichtig ist auch eine gute Kenntnis der lokalen und regionalen Märkte. Bei vielen KMUs sind die Kenntnisse über die vorhandenen staatlichen Exportförderungsinstrumente gering. Nur wenige haben solche Instrumente benutzt und konkrete Unterstützung beantragt. Vielfach wird dieses Prozedere als zu kompliziert bezeichnet und es würde zu wenig auf die spezifischen Bedürfnisse eingehen. Mit dem neuen Exportförderungsgesetz ist zu erwarten, dass die Leistungen in Zukunft zielgerichteter erbracht werden. Die KMUs sind vor allem an der Beschaffung von Marktinformationen und der Erstberatung durch Exportförderer interessiert. Zudem ist eine Unterstützung im Bereich der Projektfinanzierung (Beratung, Zuschüsse) sowie eine Unterstützung bei Fragen zu technischen Normen und Standards erwünscht. Die Leistungen sollten mit einer Ansprechperson (Key-accounters) erbracht werden. Ebenfalls wird eine Unterstützung im Rahmen von Fachmessen und Konferenzen sowie das Lobbying auf höchster politischer Ebene erwartet. Mit einer erfolgreichen Exportförderung dürfte die Position von Effizienztechnologien aber auch von erneuerbaren Technologien wesentlich verbessert werden (Kostensenkungen infolge von Lärm- und Skaleneffekten). Das BFE bereitet – gestützt auf diese Studie – ein Konzept zur Exportförderung vor.

Das Projekt ***Technologievermittlung im Energiebereich (TEVE) Kanton Bern*** [14] hat die entsprechenden Bemühungen evaluiert, die seit

5 Jahren laufen. Es wurden dabei rund 150 kantonale und ausserkantonale Kontakte festgestellt, dies bei einem Potential von rund 300 ansässigen Firmen im Energiebereich im Kanton Bern. Von den befragten Unternehmen wird die TEVE im Kanton Bern als nützliches Instrument beurteilt. Vor allem der Aspekt der Netzwerkbildung wird positiv gewertet. Hingegen konnten keine direkten kausalen Wirkungen der Tätigkeiten der TEVE auf die Schaffung von Arbeitsplätzen nachgewiesen werden. Ein gutes Drittel der befragten Firmen bestätigt jedoch, dass ihr Kontakt zur TEVE-Stelle wesentlich dazu beigetragen habe, dass neue Produkte zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. zur Förderung der Nutzung erneuerbarer Energien realisiert werden konnte. Die erzielten direkten Wirkungen konnten aber auch in diesem Bereich nicht quantifiziert werden. Die Technologievermittlung, wie sie im Kanton Bern praktiziert und vom BFE mitunterstützt wird, erzeugt im Wesentlichen indirekte positive Wirkungen. Die Evaluatoren empfehlen, dass die Aktivitäten der TEVE noch stärker auf bestimmte Adressaten- und Nutzerkreise sowie auf zu bearbeitende Schlüsselthemen fokussiert werden. Das Angebots- und Kompetenzprofil könnte damit noch deutlicher zum Ausdruck gebracht werden.

Im Projekt **Energieeffizienz bei Elektrogeräten – Wirkung der Instrumente und Massnahmen** [15] wird festgehalten, dass Elektrogeräte rund 54% des elektrischen Energieverbrauchs ausmachen. Der Elektrogerätemarkt erzielt in der Schweiz einen jährlichen Umsatz von ca. 10 Mia. CHF und eine Wertschöpfung von ca. 60%. Dabei handelt es sich um einen stark expandierenden Markt mit einem autonomen technischen Fortschritt. Die Energieeffizienzentwicklung der Elektrogeräte wird von Seite der Industrie gemäss den Studienauftragnehmern als eher sekundär betrachtet, teilweise sogar durch gegenläufige Entwicklungen gestört. Es müssten zusätzliche Anstrengungen unternommen werden, um vorhandene energieeffiziente Geräte aus ihrem Schatten- bzw. Nischendasein herauszuholen. Es fehle an Kompetenzen für serienmässig hergestellte, effiziente elektrische Geräte. Die Entwicklungen würden sowohl kontinuierlich wie sprunghaft vonstatten gehen. Zentral wäre aber weniger die Technologieentwicklung als vielmehr die Marktdiffusion von im Prinzip vorhandenen effizienten Geräten. Dabei könnte nicht alleine auf freiwillige Massnahmen gesetzt werden, vielmehr müssten eine Kennzeichnung sowie eine Warendeklaration

und in einer späteren Phase Zulassungsvorschriften für Geräte schlechter Qualität eingeführt werden. Massnahmen müssten sowohl beim point of sales (nationale und internationale Hersteller sowie Verkaufsorganisationen) wie auch beim point of purchase (pop) (das heisst nicht organisierte Käuferschaft) sowie beim Fach-, Grossverteiler- und Detailhandel ansetzen.

Im Projekt **Wirkungsanalyse kantonalen Förderprogramme im Rahmen Art. 15 EnG** [16] wird ein Monitoring- und Evaluationssystem für die Globalbeiträge für Fördermassnahmen (Subventionen und indirekte Massnahmen) aufgebaut, welche die Kantone vom Bund erhalten, wenn sie über ein eigenes kantonales Förderprogramm verfügen. Die Beiträge des Bundes sollen sich dabei nach der Höhe des kantonalen Kredites sowie der Wirksamkeit des kantonalen Förderprogramms ausrichten. Die Kantone sind verpflichtet, dem Bundesamt für Energie über die Wirksamkeit und die Auswirkungen des durchgeführten Programms sowie die Verwendung der zur Verfügung gestellten finanziellen Mittel jährlich zu berichten. Inzwischen sind die konzeptionellen Grundlagen für die Wirkungsanalysen der Kantone erstellt und in ausgewählten Kantonen sind pilotmässig erste Anwendungen in Betrieb genommen worden.

Das Projekt **Vollzug SIA Normen Gebäude** [17] ist neu gestartet worden: Es sollen unterschiedliche kantonale Vollzugsformen untersucht und Vollzugsdefizite analysiert werden. Es besteht die Erwartung, dass leistungsfähige Vorschläge (z.B. Stärkung des Haftungsrechts) gemacht werden können.

Im Projekt **Marktpotentiale und Markthindernisse für die thermische Solarenergie** [18] soll evaluiert werden, weshalb es der Solarthermik bisher nicht gelungen ist, über ein kleines Pioniersegment hinauszukommen. Es sollen Chancen und Möglichkeiten für eine Marktausweitung und Synergien mit der Minergiestrategie der Kantone aufgezeigt werden.

Mit der Studie **Umweltmanagement – ISO Norm 9000/14001 – Einbezug Energieeffizienz** [19] soll untersucht werden, wie der Energieeffizienz im Rahmen von Umweltmanagementsystemen (UMS) eine grössere Beachtung verschafft werden kann. Es werden Hemmnisse und vor allem Erfolgsfaktoren herausgearbeitet und geeignete Massnahmen für einen verstärkten Einbezug der Energieeffizienz im Rahmen von UMS evaluiert. Bewusst wird dabei auch der

Verkehrsbereich einbezogen. Neben KMU und Grossunternehmen werden auch Zertifizierungsfirmen, Umwelt- und Energieberatungsunternehmen, die öffentliche Hand, Forschungsinstitute sowie Unternehmensverbände berücksichtigt. Neben Betrieben, die bereits über Umweltmanagementsysteme verfügen, sollen auch jene beachtet werden, die noch nicht eingestiegen sind.

INTERDEPENDENZEN

Im Projekt ***Nachhaltigkeit: Kriterien und Indikatoren für den Energiebereich*** [20] zeigt sich, dass der Energiebereich wegen seiner Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit und Entwicklung eine zentrale Stellung im Nachhaltigkeitskonzept einnimmt. Dabei kennzeichnet ein komplexes Wechselspiel von Ursachen und Wirkungen den Energiebereich. Es werden die wichtigsten in- und ausländischen Systeme von Nachhaltigkeits- bzw. Energieindikatoren vorgestellt und analysiert. Die Bearbeiter schlagen aufgrund dieser Basis und weitergehenden Überlegungen ein Zielsystem mit 27 Kriterien und 60 Indikatoren vor für die Bereiche Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft. Dabei werden vier Typen von Indikatoren unterschieden: Wirkung-, Aktivitäts-, Energieeffizienz- sowie Politikindikatoren. Das System würde sich in erster Linie für eine nationale Bestandesaufnahme und die Erstellung von Zeitreihen eignen. In Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energie wurde der Erhebungsaufwand für einzelne Indikatoren geschätzt. In einem nächsten Schritt müsste nun eine politische Festlegung der Indikatoren erfolgen und die Zielwerte sowie aggregierte Gesamtbewertungen könnten eingeleitet werden.

Das Projekt ***Conception d'une procédure d'aide à la décision en matière de politique énergétique basée sur des critères et des indicateurs de développement durable*** [21] greift drei Analyseinstrumente auf, um den Fortschritt der Nachhaltigkeit zu evaluieren bzw. verschiedene Nachhaltigkeitskriterien auf einem höheren Aggregatsniveau zusammenzufassen. Die beiden Methoden DEA (Data Envelopment Analysis) und ÉLECTRE (Élimination Et Choix Traduisant la Réalité) erlaubt die Klassifizierung einer grossen Anzahl von Nachhaltigkeitsindikatoren. Die dritte Methode gewährleistet die Aggregation von Nachhaltigkeitsindikatoren, indem zuerst homogene Gruppen gebildet werden. Die konkreten Tests der Methoden werden mit internationalen Daten durchgeführt. Dabei

sind nur beschränkt effektiv brauchbare Nachhaltigkeitsindikatoren vorhanden.

MARKTORDNUNGEN

Die Studie ***Kennzeichnung der Elektrizität gemäss Artikel 12 EMG*** [22] zeigt, welche Anforderungen für die Ausgestaltung einer Kennzeichnung erfüllt werden müssen: (1) Die Herkunft muss einwandfrei nachgewiesen werden können. (2) Das Verfahren muss dem hohen Anteil des grenzüberschreitenden Stromflusses gerecht werden und berücksichtigen, dass die Kennzeichnung in der Schweiz auch unabhängig von der EU realisierbar bleibt. (3) Der Vollzug soll möglichst einfach sein. Bisher sind erst in verschiedenen Bundesstaaten der USA umfangreiche Kennzeichnungsstandards eingeführt worden: Die Kennzeichnung wird dort als integraler Bestandteil eines liberalisierten Elektrizitätsmarkts betrachtet.

In der Studie ***Grundsätze für Netzbenutzungsstarife*** [23] werden die verschiedenen Anforderungen (Transparenz, Einfachheit, Verursachergerechtigkeit usw.) diskutiert, die an die Struktur - nicht an die jeweilige Höhe - der Durchleitungsvergütung gestellt werden. Weiter werden die theoretischen Grundlagen, ausländische Erfahrungen sowie Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt und mit den vorliegenden Vorschlägen des VSE verglichen. Die Empfehlungen für die Ausgestaltung der Netzpreisstrukturen werden in Abhängigkeit der Zielsetzungen formuliert, wobei Effizienz bzw. Energiesparziele in einem gewissen konkurrenzierenden Verhältnis stehen.

In der Studie ***Data-Room Pilotprojekt*** [24] wurde in Ergänzung zum Projekt *Pilot Benchmarking Netze* eine Web basierte E-Service-Lösung durchgespielt und für 40 Schweizer Elektrizitätsunternehmen implementiert. Die gesetzten Ziele wie Effizienz des Info-Handlings, Sicherheit der Übermittlung, Anonymisierung der Information gegenüber Drittpersonen und Handlungsfreiheit der regulatorischen Behörden konnten erfüllt werden.

Die Studie ***Regulierung der Verteilnetzpreise zu Beginn der Marktöffnung*** [25] analysiert das Vorgehen von Norwegen und Schweden zu Beginn der Marktöffnung für eine kostenorientierte Regulierung der Netzpreise. In Norwegen haben die zu geringen Effizienzsteigerungen dazu beigetragen, dass eine anreizorientierte Regulierung (Erlösobergrenze mit Benchmarking) eingeführt wurde. In Schweden wird am kosten-

orientierten Konzept mit ex-post-Monitoring festgehalten, wobei die Regulierungsbehörde Preissenkungen von den Netzbetreibern fordert. In beiden Ländern wird die Festlegung der Struktur der Netzpreise den Netzbetreibern überlassen; es werden lediglich allgemeine Vorgaben bezüglich Verursachergerechtigkeit und Nichtdiskriminierung gemacht. In beiden Ländern werden rund 20 bis 25 Personen zur Regulierung der Netzpreise eingesetzt. Die Anforderungen an das Rechnungswesen stellt die betroffenen Unternehmen vor teilweise beträchtliche Herausforderungen.

In den **Perspektiven für die Wasserkraftwerke in der Schweiz** [26] wird untersucht, ob die Strommarktliberalisierung die langfristige Wettbewerbsfähigkeit der Wasserkraftwerke beeinträchtigt und welche Massnahmen dagegen ergriffen werden könnten. Die wichtigsten Determinanten der Wettbewerbsfähigkeit sind: die zukünftigen Strommarktpreise, die Kapitalkosten, die Wasserzins, Bestimmungen zu den Restwassermengen und die Steuern für Unternehmen, die sich nahe an der Rentabilitätsgrenze befinden. Die Ergebnisse der Analyse deuten darauf hin, dass in Zukunft mit einer bedeutenden Anzahl von Unternehmen gerechnet werden muss, die auf eine Erneuerung ihrer Anlagen verzichten würden, wenn sich die Rahmenbedingungen für die Wasserkraft in Zukunft nicht ändern. Die Prognosen sind allerdings mit grossen Unsicherheiten verbunden. Als besonders erfolgversprechend werden alle Massnahmen in Richtung Internalisierung der externen Kosten der Energieerzeugung bezeichnet. Zudem sollten gezielte Unterstützungsmassnahmen für einzelne Werke flankierend eingesetzt werden.

Im Rahmen des Projektes **Perspektiven für die Wasserkraftwerke in der Schweiz** sind zudem die **Chancen des Ökostrommarktes** [27] abgeklärt worden. Grundsätzlich kann von einem Interesse vieler Konsumentinnen und Konsumenten an der Nutzung erneuerbarer Energie, deren Bereitstellung die Umwelt wenig belastet, ausgegangen werden. In Befragungen wird etwa eine Zahlungsbereitschaft für 20% höhere Preise bei rund 10% der Haushalte festgestellt. Effektiv sind diese Ziele im Rahmen des Ökostrommarketings noch nicht erreicht worden. Generell kann gesagt werden, dass, je kritischer die Konsumentinnen und Konsumenten eingestellt sind, desto höhere Anforderungen an die ökologische Produktion des Stromes gestellt werden.

Im Rahmen der Veranstaltung vom 22. November 2001 **Öffnung des Strommarktes - Beiträge der energiewirtschaftlichen Forschung** [28], welche mit 150 Personen sehr gut besucht worden ist, wurden die Projekte **Ouverture du marché de l'électricité à la concurrence. Évolution à l'étranger** [29] und **Liberalisierung und Service public: Mit Spielregeln zum Doppelsieg** [30] durchgeführt. Grundsätzlich kann die Strommarktöffnung gemäss ausländischer Erfahrungen zu befriedigenden Resultaten führen. Probleme und Schwierigkeiten dürfen aber nicht unterschätzt werden. Mit klaren staatlichen Rahmenbedingungen, unter anderem einer Regulierungsbehörde, können negative Effekte beseitigt werden. Dabei sind von der Regulierungsbehörde die Marktkräfte zu berücksichtigen. Damit können Fehlentwicklungen – wie etwa in Kalifornien – vermieden werden. In der Studie **Liberalisierung und Service public** wird dieser klar definiert. Es wird dargelegt, dass der Service public auf die vorgesehenen flankierenden Massnahmen gemäss Elektrizitätsmarktgesetz angewiesen ist, wobei der freie Netzzugang, die flächendeckende Erschliessung und die angemessene Preissolidarität zu den wichtigsten Elementen gehören.

Das Projekt **Stromeinfuhr oder Gasverstromung im Inland** [31] gelangt zum Ergebnis, dass (1) gegen Ende 2010 GuD-Kraftwerke mit einer Leistungsklasse von 100 bis 400 MW_{el} gebaut werden könnten. Es wird nicht ausgeschlossen, dass derartige Kraftwerke auch in der Schweiz erstellt werden, wobei sich die Investorentscheide am europäischen Energiemarkt und den europaweiten Standortmöglichkeiten für GuD-Anlagen orientieren. (2) Die Auswirkungen des Baus von GuD-Anlagen betreffen vor allem die Kosten, Emissionen und den Primärenergieverbrauch. Im Vergleich zum europäischen Energiemarkt ergeben sich günstigere Verhältnisse für eine Gasverstromung in der Schweiz als für einen Stromimport. Letztlich ist für die Standortbeurteilung die unternehmerische Sicht eines potenziellen Investors massgebend.

Die Studie **Auswirkungen der Marktöffnung im Gasbereich** [32] zeigt, dass sich neu ein Wettbewerb der Gaslieferanten einstellen kann. Dabei ist die Erdgas-Wirtschaft seit jeher der Konkurrenz mit dem Wärmemarkt, vor allem mit Heizöl, ausgesetzt und unter entsprechendem Kostendruck. Im Gegensatz zur Elektrizitätsversorgung konnten deshalb keine Monopolrenten aufgebaut werden. Die Gaswirtschaft auf

dem europäischen Kontinent ist geprägt durch ein Oligopol bei der Produktion. Die Erdgaspreise der langfristigen Lieferverträge sind an die Preisentwicklung von Heizöl (Wärmemarkt bzw. Kohle, Elektrizitätsmarkt) gebunden. Man kann davon ausgehen, dass diese Preisbindungen auch bei geöffnetem Markt bestehen bleiben. Internationale Grosshändler werden in den Schweizer Markt eindringen. Dieser Wettbewerb wird sich auf die grösseren Kunden in der Schweiz konzentrieren und in erster Linie dieje-

nigen mit abschaltbaren Lieferungen betreffen. Die Endverkäuferpreise für Haushalte werden vor allem bei einem tieferen Niveau der Heizölpreise mehrheitlich durch die Kosten der Verteilung bestimmt und sie werden vom internationalen Wettbewerb tangiert. Die Auswirkungen der Gasmarktöffnung sind nicht mit denjenigen beim Elektrizitätsmarkt vergleichbar. Die angestrebten Vorteile eines geöffneten Markts hängen weitgehend von der Gestaltung und Regulierung von Transport und Verteilung ab.

Nationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des Forschungsprogramms *Energiewirtschaftliche Grundlagen* (EWG) wird mit verschiedenen Universitäten Fachhochschulen, ETH-Instituten und privaten Forschungsstellen zusammengearbeitet. Wichtig ist auch die Kooperation mit den Kantonen, vor allem im Gebäudebereich und mit den interessierten Fach-

verbänden. Praktisch alle Projekte des Forschungsprogramms EWG werden von speziellen Begleitgruppen betreut. Die Qualitätssicherung, aber auch gute Voraussetzungen für die Umsetzung der Forschungsergebnisse können damit am ehesten gewährleistet werden.

Internationale Zusammenarbeit

Einzelne Projekte sind von ausländischen Instituten mit bearbeitet worden. Es bestehen vielfältige Beziehungen zu Hochschulen und privaten Forschungsstellen. Selbstverständlich wird in den einzelnen Projekten von ausländischen Forschungsergebnissen ausgegangen und konkrete Erfahrungen werden in den Analysen systematisch berücksichtigt. Hingegen sind im Berichtsjahr keine Projekte – etwa im Rahmen von EU-

Programmen – durchgeführt worden. Einerseits hängt dies mit dem Auslaufen des 5. EU-Rahmenprogramms zusammen, andererseits kann die Beteiligung an EU-Forschungsprogrammen nicht in allen Teilen als sehr ergiebig bezeichnet werden. Die Aufwendungen der Forschungsstellen in Relation zu den neuen Erkenntnissen steht nicht in einem günstigen Verhältnis.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Im Jahr 2001 konnten erhebliche **Fortschritte im Bereich der Analysen zum Strommarkt** erzielt werden. Dabei sind die Resultate teilweise direkt in die erarbeitete Energiemarktverordnung eingeflossen. Weitere Fortschritte können in der Analyse der Kosten- und Wirtschaftlichkeit von einzelnen Energiesystemen festgestellt werden. Ebenfalls sind einzelne Massnahmen ex post und ex ante analysiert worden. In den Bereichen Daten, Wirtschaftlichkeitsanalysen und Massnahmen besteht nach wie vor ein grosser Nachholbedarf. Vor allem aber ist es ein **Anliegen des EWG, die Forschung vermehrt auf eine grundsätzliche sowie eine längerfristig ori-**

enterte Optik auszurichten, um den Anliegen des Energieforschungskonzepts der CORE vermehrt nachzukommen.

Im Jahre 2002 werden die Schwerpunkte in den Bereichen Kosten und Wirtschaftlichkeit sowie Analyse von Massnahmen, insbesondere im Gebäudebereich, liegen. Zudem ist es gelungen, ein Projekt über nachhaltige Energieversorgung und Energienutzung mit einer längerfristigen Perspektive zu starten. Neben weiteren Analysen zugunsten eines nachhaltigen Gebäudeparks soll im Sommer 2002 ein weiterer Schwerpunkt im Bereich Elektrizität und Geräte hinzukommen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2001 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENET: Bestellnummer des Berichts bei ENET

unter den angegebenen Internet-Adressen können die Berichte heruntergeladen werden

Daten

- [1] S. Frauenfelder (frauenfelder@linder-kom.ch). Linder Kommunikation/Frauenfelder, *Zürich: Indikatoren zu ausgewählten kantonalen Energiemassnahmen* (JB).
- [2] C.U. Brunner (cub@cub.ch). CUB, 8001 *Zürich: Vorstudie Energieverbrauch im öffentlichen Verkehr* (SB) www.ewg-bfe.ch/Publikationen.

Perspektiven

- [3] K. Eckerle (konrad.eckerle@prognos.com), Prognos, *Basel: Koordination der Modellierungs- und Perspektivarbeiten* (SB) www.prognos.com
- [4] P. Hofer (Peter.Hofer@prognos.com), Prognos, *Basel: Energieperspektiven-Ex-post-Analyse des Energieverbrauchs der Haushalte 2000* (SB) www.prognos.com ENET 194523

Modelle

- [5] A. Müller, M. Vickart (mueller@ecoplan.ch), Ecoplan, *Bern: Ausstieg aus der Kernenergie – wirtschaftliche Auswirkungen* (SB) www.ecoplan.ch

Kosten/Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz von Energiesystemen

- [6] W. Ott, B. Seiler (walter.ott@econcept.ch), Econcept, *Zürich: Neu Bauen statt Sanieren* (JB) www.econcept.ch
- [7] L. Keller (keller.burnier@span.ch), Bureau d'Études Keller-Burnier/IPSO, *Lavigny. Adhérence de l'aération douce dans les logements* (SB) BBL, Vertrieb Publikationen: 805.048 d und f
- [8] M. Jakob, E. Jochem, K. Christen, P. Stocker (martin.jakob@cepe.mavt.ethz.ch), PSI, CEPE, ETH-HBT, *Zürich: Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen* (JB) www.cepe.ethz.ch
- [9] M. Jakob, E. Jochem (martin.jakob@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, *Zürich: Erhebung des Erneuerungsverhaltens bei Wohngebäuden* (JB) www.cepe.ethz.ch
- [10] H. Eicher, R. Rigassi (reto.rigassi@eicher-pauli.ch), Dr. Eicher+Pauli, *Liestal: Technologie-Monitoring* (JB) www.eicher-pauli.ch
- [11] H. Eicher, R. Rigassi (reto.rigassi@eicher-pauli.ch), Dr. Eicher+Pauli, *Liestal: CH-Entwicklung WKK* (JB) www.eicher-pauli.ch
- [12] P. Zweifel, Y. Schneider (yschneider@soi.unizh.ch), Sozialökonomisches Institut (SOI) Universität *Zürich*, Prof. Dr. Massimo Filippini, CEPE/ETHZ: *Marginale Zahlungsbereitschaft für eine erhöhte Internalisierung des Risikos von Kernkraftwerken* (SB) www.soi.unizh.ch

Massnahmen

- [13] R. Iten, B. Oetli, Infrac, Zürich & E. Jochem, W. Mannsbart, ISI, *Karlsruhe*, Deutschland (zuerich@infrac.ch), Infrac, *Zürich: Exportförderung im Energiebereich* (SB) www.infrac.ch
- [14] H.M. Binder, R. Schaller, Dr. A. Balthasar (binder@interface-politikstudien.ch), Interface Institut für Politikstudien, *Luzern: Technologievermittlung im Energiebereich (TEVE) Kanton Bern* (SB) www.interface-politikstudien.ch, BBL, Vertrieb Publikationen: 805.051 d
- [15] C.U. Brunner, (conrad.u.brunner@energieagentur.ch), E. Bush, S. Gasser, S. Lingenhel, J. Nipkow, S.A.F.E., *Zürich: Energieeffizienz bei Elektrogeräten – Wirkung der Instrumente und Massnahmen* (SB) BBL, Vertrieb Publikationen: 805.047 d

- [16] R. Iten, Infrac, (zuerich@infrac.ch), Th. Nordmann, TNC, *Zürich: Wirkungsanalyse kantona-ler Förderprogramme im Rahmen Art. 15 EnG* (SB) www.infrac.ch
- [17] R. Dettli, P. Renaud, B. Signer, W. Ott (reto.dettli@econcept.ch), Econcept, *Zürich* in Zusammenarbeit mit Planair: **Vollzug SIA Normen Gebäude** (JB) www.econcept.ch
- [18] F. Gerheuser (frohmut.gerheuser@smile.ch), Büro für Politikberatung, *Brugg: Marktpoten-tiale und Markthindernisse für die thermische Solarenergie* (JB)
- [19] G. Beltrani (guido.beltrani@ebp.ch), O. Schelske, Ernst Basler + Partner, D. Peter, B. Oettli, Infrac *Zürich: Umweltmanagement – ISO Norm 9000/14001 – Einbezug Energieeffizienz* (JB) www.ebp.ch

Interdependenzen

- [20] U. Brodmann, F. Gubler, F. Walter (walter@ecoplan.ch), Ecoplan, *Bern* & Factor Consulting+Management, *Zürich: Nachhaltigkeit: Kriterien und Indikatoren für den Energiebereich* (SB) www.ecoplan.ch, BBL, Vertrieb Publikationen: 805.046 d
- [21] F. Carlevaro, St. Genoud, M. Garbely (fabrizio.carlevaro@metri.unige.ch), CUEPE, Université de *Genève: 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)

Marktordnungen

- [22] R. Dettli, J. Markard (reto.dettli@econcept.ch), Econcept in Zusammenarbeit mit Eawag, *Zü-ri- ch: Kennzeichnung der Elektrizität gemäss Artikel 12 EMG* (SB) www.econcept.ch
- [23] R. Iten, A. Vettori, Infrac, W. Ott, Econcept, J. Wild, CEPE (zuerich@infrac.ch), *Zürich: Grund-sätze für Netzbenutzungstarife* (SB) www.infrac.ch BBL, Vertr. Publikationen: 805.050.1 d
- [24] R. Bacher (Rainer.Bacher@BacherConsulting.com), Bacher Consulting, *Baden-Dättwil: Data-Room Pilotprojekt* (SB) www.BacherConsulting.com
- [25] M. Filippini, J. Wild, C. Luchsinger (filippini@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, *ETH-Zürich: Regulie-rung der Verteilnetze zu Beginn der Marktöffnung* (SB) www.cepe.ethz.ch, BBL, Vertrieb Publikationen: 805.049 d
- [26] M. Filippini, S. Banfi, C. Luchsinger, J. Wild (banfi@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, *ETH-Zürich* und Istituto di Microeconomia e economia Pubblica (MecolP), Università della Svizzera italiana: **Perspektiven für die Wasserkraftwerke in der Schweiz** (SB) www.cepe.ch, BBL, Vertrieb Publikationen: 805.053.1
- [27] D. Spreng, B. Truffer, R. Wüstenhagen (spreng@cepe.mavt.ethz), CEPE, *ETH-Zürich* und EA-WAG, *Zürich: Die Chancen des Ökostrommarktes* (SB) www.cepe.ch
- [28] Forschungsprogramm EWG, *Bern: Öffnung des Strommarktes. Beiträge der energie-wirtschaftlichen Forschung* Tagungsband, November 2001, BBL, Vertrieb Publikationen: 805.558 d und f
- [29] F. Romero (franco.romerio@cuepe.unige.ch), CUEPE, Université de *Genève: Ouverture du marché de l'électricité à la concurrence. Évolution à l'étranger* (SB)
- [30] H. Sommer (sommer@ecoplan.ch), Ecoplan, *Altdorf: Liberalisierung und Service public: Mit Spielregeln zum Doppelsieg* (SB) www.ecoplan.ch
- [31] M. Sättler, W. Bohnenschäfer, M. Schlesinger (martin.saettler@prognos.com), Prognos, *Basel: Stromeinfuhr oder Gasverstromung im Inland* (SB) www.prognos.com, BBL, Vertrieb Pu-blikationen: 805.541 d
- [32] R. Dettli, B. Signer, Y. Kaufmann (reto.dettli@econcept.ch), Econcept, *Zürich: Auswirkungen der Marktöffnung im Gasbereich* (SB) www.econcept.ch, BBL, Vertrieb Publikationen: 805.542 d

ANHANG / ANNEXE

Abkürzungsverzeichnis / Répertoire des sigles

ÖFFENTLICHE FORSCHUNGSINSTITUTE /
INSTITUTIONS PUBLIQUES DE RECHERCHE

BFH	Berner Fachhochschule
HTA	Hochschule für Technik und Architektur, <i>Biel, Burgdorf</i>
SHL	Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, <i>Zollikofen</i>
EAWAG	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, <i>Dübendorf</i>
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
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>

ORGANISATIONEN & PROGRAMME /
ORGANISATIONS & PROGRAMMES

BRITE-EURAM & GROWTH	Basic Research in Industrial Technologies for Europe / European Research on Advanced Materials (EU-Forschungsprogramm)
CORE	Commission fédérale pour la recherche énergétique / Eidgenössische Energieforschungskommission
COST	Coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique (EU)
EU	Europäische Union
EURATOM	Europäische Atomgemeinschaft
EUREKA	Akronym für den Plan einer gesamteuropäischen Forschungszusammenarbeit im Spitzentechnologiebereich
IEA	Internationale Energie-Agentur
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
JET	Joint European Torus (EU-Forschungsprogramm)
JOULE-THERMIE & EESD	EU-Programm für Forschung, Entwicklung und Demonstration auf dem Gebiet der nicht-nuklearen Energie
OECD	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 Brennstoff- zellen) / Couplage chaleur-force (sans les piles à combustible)	F. Rognon	M. Zogg	F. Rognon
	Verbrennung / Combustion	A. Hintermann	A. Hintermann	
	Brennstoffzellen / Piles à combustible			
	Prozesse (in Industrie, Gewerbe, Landwirt- schaft,..) inkl. Abwärme / Procédés (dans l'industrie, les arts et métiers, l'agri- culture,..) y compris les rejets de chaleur	M. Geissmann	M. Zogg	M. Geissmann
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	M. Zogg	F. Rognon
	Biomasse (ohne Holz) / Biomasse (sans le bois)	N.N.	N.N.	N.N.
	Kleinwasserkraftwerke / Force hydraulique			H. P. Leutwiler
	Holz / Bois	D. Binggeli	D. Binggeli	C.W. Rutschmann
	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		S. Chakraborty	—
	Kernfusion / Fusion nucléaire		J.-F. Conscience	—
IV. Energiewirtschaft- liche Grundlagen / Fondements de l'éco- nomie énergétique	Energiepolitik / Politique énergétique	M. Beck	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 :

Martin Beck, Tel. 031 / 322 56 29

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

Andreas Gut, Tel. 031 / 322 53 24

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

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

Engineering & Consulting

Zwillikerstr. 8, 8913 Ottenbach

Tel. 01 / 760 00 66 – Fax : 01 / 760 00 68

E-mail : roland.brueniger@r-brueniger-ag.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

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 Nierendorf

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 44 11

E-mail : peter.hosemann@psi.ch

Hanspeter Leutwiler

ITECO, Postfach, 8910 Affoltern am Albis

Tel. 01 / 762 18 18 – Fax : 01 / 762 18 15

E-mail : 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@dial.eunet.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 28 – Fax : 032 / 931 18 68

E-mail : info@planair.ch

Christoph-Walter Rutschmann

VHe, Seefeldstr. 5a, 8008 Zürich

Tel. 01 / 250 88 10 – Fax : 01 / 250 88 22

E-mail : rutschmann@vhe.ch

Sabyasachi Chakraborty

HSK, 5232 Villigen HSK

Tel. 056 / 310 39 36 – Fax : 056 / 310 39 95

E-mail : chakraborty@hsk.psi.ch

Markus Zimmermann

EMPA-KWH, 8600 Dübendorf

Tel. 01 / 823 41 78 – Fax : 01 / 821 62 44

E-mail : mark.zimmermann@empa.ch

Martin Zogg

Kirchstutz 3, 3414 Oberburg

Tel. 034 / 422 69 11 – Fax : 034 / 422 69 10

E-mail : martin.zogg@bluewin.ch