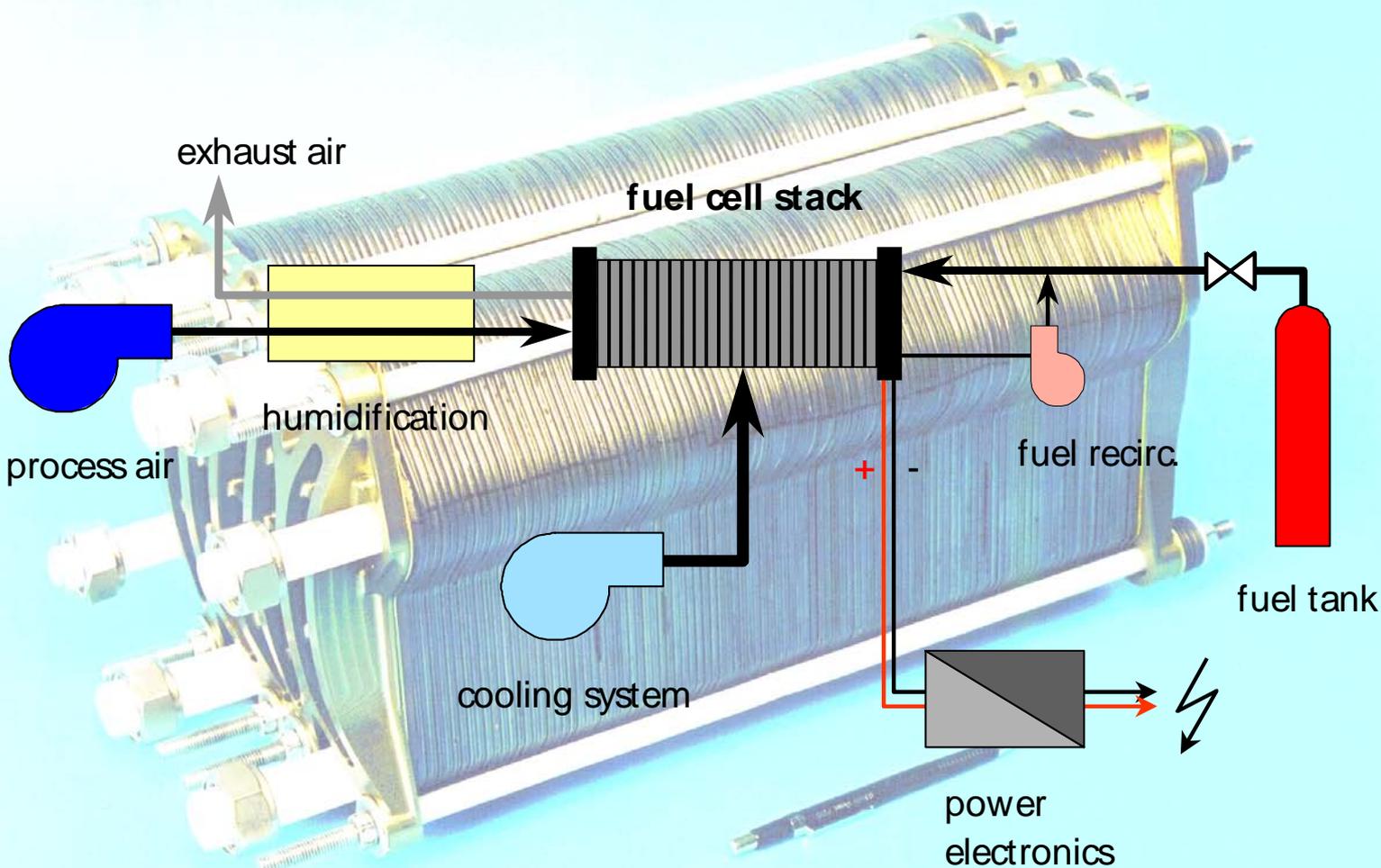


Energie-Forschung 2000

Recherche énergétique

Überblicksberichte der Programmleiter
Rapports de synthèse des chefs de programme



Überblicksberichte der Programmleiter
Rapports de synthèse des chefs de programme

Vorwort / Avant-propos	3
Fortschritte der Energieforschung 2000	4

Forschungsprogramme – Programmes de recherche

Bereich	Programm	
RATIONELLE E- NERGIENUTZUNG	Rationelle Energienutzung in Gebäuden	7
	Verkehr und Akkumulatoren	17
	Elektrizität	29
	Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung	39
	Brennstoffzellen	51
	Feuerung und Verbrennung	59
ERNEUERBARE ENERGIEN	Solaire actif	71
	Stockage de chaleur	79
	Photovoltaik	87
	Solarchemie / Wasserstoff	99
	Biomasse	109
	Geothermie	117
	Windenergienutzung	125
	Kleinwasserkraftwerke	133
KERNENERGIE	Nukleare Sicherheit und Entsorgung	139
	Regulatorische Sicherheitsforschung	149
	Fusion thermonucléaire contrôlée	157
ENERGIEWIRT- SCHAFTLICHE GRUNDLAGEN	Energiewirtschaftliche Grundlagen	163

Anhang – Annexe

Forschungs- und P+D-Organisation / Organisation de la Recherche et P+D	172
Wichtige Adressen / Adresses importantes	173

VORWORT

Die Energieforschung der öffentlichen Hand der Schweiz richtet sich nach dem *Konzept der Energieforschung des Bundes 2000 – 2003*. 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-, Pilot- und Demonstrationsprogramme obliegt internen und externen Programmleitern, welche verschiedenen Technologiebereichen zugeordnet sind. Eine Übersicht über die Organisation mit den entsprechenden Kontaktadressen findet sich im Anhang.

Die *Liste der Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprojekte im Bereich der Energie in der Schweiz 1998/1999* gibt die gesamten Aufwendungen der mit öffentlichen Mitteln finanzierten Energieforschung und eine detaillierte Zusammenstellung der entsprechenden Geldflüsse. Im Jahr 2000 wurde die Energieforschung in vergleichbarem Rahmen wie 1999 unterstützt, also mit ca. 180 Mio. Franken.

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 ebenfalls auf der *Internetseite* des BFE eingesehen werden. Die meisten Jahresberichte der verschiedenen Projekte können dort mittels Hyperlinks in den Syntheseberichten auch heruntergeladen werden. In gedruckter Form sind die einzelnen Jahresberichte (JB) beziehungsweise Schlussberichte (SB) zu beziehen bei ENET, Egnacherstrasse 69, 9320 Arbon oder unter www.energieforschung.ch. Das Reproduzieren von einzelnen Beiträgen ist – unter Angabe der Quelle – gestattet.

April 2001
BUNDESAMT FÜR ENERGIE

Zur Illustration auf dem Umschlag:

Entwicklung von Brennstoffzellen und Systemen am PSI

Skizze der Flüsse und Bild eines 6.5-kW-Stapels, der in einem Familien-Elektroauto zum Einsatz kommen soll. (Siehe Programme Brennstoffzellen, Seite 51, und Verkehr, Seite 17.)

AVANT - PROPOS

Le Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération 2000 – 2003 est le fil conducteur durant cette période 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, développement et démonstration" (RD&D) relève de responsables internes ou externes à l'OFEN, chacun supervisant un domaine technologique spécifique. 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 1998/1999 inclut l'ensemble des moyens attribués par les pouvoirs publics à la recherche énergétique. On y trouve aussi une revue détaillée des montants provenant des diverses sources de financement. Les fonds alloués à la recherche énergétique en 2000, stables par rapport à l'année précédente, devraient s'élever à quelque 180 millions de francs.

Le présent document 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, et destiné à un large public. La plupart des rapports annuels des divers projets 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. Les rapports annuels (RA) et finals (RF) en version papier sont à commander auprès d'ENET, Egnacherstrasse 69, 9320 Arbon, ou directement sur le site www.energieforschung.ch. La reproduction d'extraits du présent volume est autorisée, à condition d'indiquer la source.

Avril 2001
OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉNERGIE

Illustration de la couverture:

Développement de piles à combustibles et systèmes au PSI

Schéma des flux et photographie d'une pile de 6.5 kW, qui est appelée à équiper une voiture électrique familiale. (Voir programme Piles à combustible, page 51, et programme Transport, page 17.)

FORTSCHRITTE DER ENERGIEFORSCHUNG 2000

SURVOL DE LA RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE EN 2000

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

Der Abbau der öffentlichen Mittel für die Energieforschung hat sich in den letzten beiden Jahren verlangsamt. Gemäss dem *Konzept der Energieforschung des Bundes 2000 – 2003* sollen nun die Bereiche rationelle Energienutzung, erneuerbare Energien und energiewirtschaftliche Grundlagen durch zusätzliche Mittel gestärkt werden. In ihrem Jahresbericht betont die Eidgenössische Energieforschungskommission, CORE, dass sowohl der Bund als auch die Kantone gefordert sind, die Rahmenbedingungen für die Energieforschung zu verbessern.

Die Ablehnung der Energievorlagen an der eidgenössischen Abstimmung vom 24. September 2000 hat auch einen dämpfenden Einfluss auf die Forschung. Obwohl mancherorts die öffentliche Diskussion das Interesse an der Schweizer Energieforschung verstärkt hat, dürfte die erhoffte Verbesserung der finanziellen Unterstützung – nach den Jahren der Budgetkürzungen – schwieriger sein.

Die Debatten um das Elektrizitätsmarktgesetz (EMG) führten zu einer Verunsicherung in den Branchen der erneuerbaren, stromproduzierenden Energietechnologien, was eine bremsende Wirkung auf die Umsetzung der Forschungsergebnisse hat.

Im Jahre 2000 konnten wiederum Resultate erzielt werden, die ein internationales Echo auslösten. Auf der anderen Seite gewinnt neben dieser Spitzenforschung die wirtschaftliche Umsetzung weiter an Bedeutung.

In der internationalen Zusammenarbeit spielt die Schweiz durch die Teilnahme an 18 Programmen der *Internationalen Energieagentur* (IEA) sowie in mehr als 100 Forschungsprojekten der EU-Rahmenprogramme weiterhin eine aktive Rolle.

2001 startet das energiepolitische Programm *EnergieSchweiz*. Die Energieforschung und insbesondere die P+D Projekte werden voll in dieses Programm integriert. Die Forschungsprogramme *Feuerung und Verbrennung* sowie *rationelle Energienutzung in Gebäuden* werden 2001 unter Beteiligung eines internationalen Expertenteams evaluiert. Zudem führt das Paul Scherrer Institut (PSI) 2001 in eigener Regie ein Audit seiner Energieforschungsbereiche durch.

Der folgende Überblick enthält eine Auswahl von Ergebnissen aus dem Jahr 2000. Die Auswahl ist persönlich und soll die Neugier des Lesers auf die weiteren im Bericht vorgestellten Forschungsschritte wecken.

L'érosion des fonds publics alloués à la recherche énergétique s'est ralentie durant les deux dernières années. Selon le *Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération 2000 – 2003*, ce sont les domaines de l'utilisation rationnelle de l'énergie, des sources d'énergie renouvelables et des fondements de l'économie énergétique qui doivent être renforcés. Dans son rapport annuel, la Commission fédérale pour la recherche énergétique, CORE, souligne que tant la Confédération que les Cantons doivent améliorer les conditions cadres de la recherche énergétique.

Les votations du 24 septembre 2000 ont aussi freiné la recherche énergétique. Bien que, ici et là, le débat public ait renforcé l'intérêt pour la recherche énergétique menée en Suisse, l'amélioration espérée du soutien financier s'avère plus difficile après des années de coupes budgétaires.

Les débats consacrés à la loi sur le marché de l'électricité (LME) ont conduit à une insécurité dans les milieux des technologies énergétiques renouvelables produisant de l'électricité, ce qui a mis un frein au transfert de résultats de la recherche dans ce domaine.

Durant l'année 2000, on peut à nouveau mentionner des résultats qui ont suscité un écho international. D'autre part, il est à signaler que, à côté de cette recherche de pointe, le transfert commercial s'est accru notablement.

Sur le plan de la collaboration internationale, la Suisse continue de jouer un rôle important, en participant actuellement à 18 programmes de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) et à plus de 100 projets des Programmes cadres de recherche et de développement technologique de l'Union européenne.

En 2001 débute le programme *SuisseEnergie*. La recherche énergétique et plus particulièrement les projets P+D y sont totalement intégrés. Les programmes de recherche "Combustion et carburation" ainsi que "Utilisation rationnelle de l'énergie dans les bâtiments" seront évalués en 2001 sous la houlette d'un groupe d'experts internationaux. L'Institut Paul Scherrer (PSI), de son côté, mettra sur pied cette année un *audit* de sa propre recherche énergétique.

Ce survol de la RD&D énergétique donne un aperçu des activités réalisées au cours de l'année 2000. Le choix est personnel et devrait donner au lecteur l'envie de prendre connaissance des progrès de la recherche présentés dans ce rapport.

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG

Im Gebäudebereich hält der **Passivhaus-Standard** Einzug. Er senkt den Energieverbrauch soweit, dass auf ein aktives Heizsystem verzichtet werden kann. Im Jahr 2000 wurden fünf neue Passivhaus-P+D-Projekte in Angriff genommen.

Die **Arbeiten an einem Brennstoffzellen-Energie-wandler mit Supercap-Zwischenspeicher** am PSI hat das Interesse der deutschen Automobilindustrie geweckt und zu einer gemeinsamen Entwicklung eines **familientauglichen Autos** geführt.

Elektrische Antriebe gehören zu den grössten Verbrauchern von Elektrizität in der Schweiz und bergen ein beträchtliches Einsparpotenzial. In einer Studie konnte gezeigt werden, dass allein bei Druckluftanlagen (1,5% des nationalen Stromverbrauchs) wirtschaftliche Energieeinsparungen zwischen 5% und 50% möglich sind.

Ein grosses Marktpotential für Wärmepumpen ist bei der Bausanierung vorhanden. Von vier eingereichten Funktionsmustern zur **Swiss Retrofit Heat Pump** konnte im Rahmen einer Ausscheidung eine Versuchsanlage für eine Felderprobung in der Heizperiode 2000/01 bereitgestellt werden.

Die Nahwärmeverbundanlage der AEB Birsfelden wurde mit einer 200-kW_{el}-**Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)** ausgestattet. Diese als P+D-Projekt geförderte Anlage wird wichtige Erkenntnisse über den praktischen Betrieb und für die Weiterentwicklung dieses Brennstoffzellentyps liefern.

In einem von den Industriepartnern Liebherr und Hydromag unterstützten Projekt wird untersucht, wie die strengen **Abgasnormen EURO III und IV** bei Nutzfahrzeug-Dieselmotoren realisiert werden können. Bei der Senkung von Partikelemissionen wurden bereits erste Erfolge erzielt, indem herkömmlichem Dieseldieselkraftstoff Butylal beigefügt wurde.

ERNEUERBARE ENERGIEN

An der ETH-Lausanne wurde eine **thermische Solarkraftanlage** von 10 kW_{el} realisiert. Die optische Ausbeute der Anlage beträgt dank einem Lamellen-spiegel bereits 60% und die Ausbeute des Kollektors bei einer Temperatur von 135 °C erreicht 53%.

Mit dem Ziel das Volumen von **Jahreszeiten-Wärmespeichern** im Vergleich zu Wasser um den Faktor 3 – 4 zu reduzieren, wurden aus verschiedenen getesteten Materialien *Zeolith* und *Silikagel* für eine detaillierte Untersuchung ausgewählt.

In den Bereichen **Dünnschicht- und Farbstoff-Solarzellen** standen im Berichtsjahr neue Projekte im Vordergrund. Dabei wurde besonders auf die industrielle Machbarkeit des Konzepts geachtet und weniger auf Rekordwerte einzelner Parameter. Fernziel ist eine Solarzelle *made in Switzerland*.

UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE

Le **standard "maison passive"** fait son chemin. Il diminue la demande énergétique au point que l'on peut se passer d'un système de chauffage actif. En 2000 ce sont cinq nouveaux projets P+D de "maisons passives" qui ont été entrepris.

Les travaux sur un **convertisseur d'énergie par une pile à combustible combinée à un stockage d'énergie par supercondensateur**, menés à chef au PSI, ont attiré l'attention de l'industrie automobile allemande avec laquelle une collaboration a été établie pour le développement d'une **voiture familiale**.

Les **moteurs électriques** comptent parmi les plus gros consommateurs d'électricité en Suisse et ils recèlent un potentiel considérable d'économie. Une étude a montré que, dans les installations à air comprimé seulement (1,5% de la consommation nationale d'électricité), le potentiel d'économie se trouve entre 5% et 50%.

Il existe un grand marché potentiel pour les pompes à chaleur dans le domaine de la rénovation de bâtiments. Parmi quatre candidats, une installation pilote a été retenue dans le cadre d'une évaluation par **Swiss Retrofit Heat Pump** pour la période de chauffage 2000/01.

Le réseau de chauffage de quartier de AEB, Birsfelden, a été équipé d'une **pile à combustible à acide phosphorique** de 200 kW_{el}. (**PACF**). Cette installation, soutenue comme projet P+D, devrait donner de précieux enseignements sur l'exploitation pratique de ce type de pile et sur les perspectives de développement ultérieur.

Un projet soutenu par deux partenaires industriels (Liebherr et Hydromag) visait à mettre en œuvre les **normes d'émission EURO III et IV** – très sévères – pour les véhicules utilitaires à moteur diesel. Lorsque l'additif Butylal est ajouté au carburant diesel, les émissions de particules sont abaissées, ce qui constitue un premier succès.

SOURCES D'ÉNERGIE RENOUEVABLES

Le projet d'une **centrale électro-thermo-solaire** de 10 kW_{el} s'est concrétisé par l'installation d'un prototype sur le site de l'EPF-Lausanne. Le rendement optique atteint déjà 60% grâce à un miroir à lamelles et le rendement de captage à 135 °C s'élève à 53%.

Dans le but de réduire d'un facteur 3 à 4 le volume du **stockage saisonnier de chaleur**, par rapport à une masse d'eau, de nouveaux matériaux pour le stockage thermique ont été étudiés. La *zéolithe* ou le *silicagel* sont les candidats qui ont été identifiés et qui vont encore être testés dans diverses conditions.

Au premier plan figurent cette année de nouveaux projets dans le domaine des **cellules photovoltaïques à couche mince et des cellules à colorant**. Ce sont plus les aspects de la faisabilité industrielle qui ont été retenus que la poursuite de records pour certains paramètres. Le but reste toujours d'avoir une cellule photovoltaïque *made in Switzerland*.

Mit einem neuartigen, **solarthermischen Recycling-Reaktor** gelang es weltweit erstmals, aus stark schwermetallhaltigem Filterstaub bei Temperaturen von 1200 – 1300 °C metallisches Blei und Zink zu isolieren.

Beim P+D-Projekt **Green Gas, Biogas als Treibstoff** wird angestrebt, jedes Jahr mindestens je eine neue Produktions- und Tankanlage zu bauen. Bis 2005 sollen 50% des industriell produzierten Biogases – d.h. 6000 t/a – als Treibstoff zur Verfügung stehen.

Das in Forschung und Realisierung gewonnene **Fachwissen** von Schweizer Firmen im Bereich **Geothermie** ist gefragt. Im Berichtsjahr wurden Aufträge aus Österreich, Holland, Deutschland, Frankreich, Griechenland und Japan an Schweizer Unternehmen vergeben. In der Schweiz konnte u. a. eine Energiepfehanlage für das neue *Dock Midfield* des Flughafens Zürich realisiert werden.

Bis 2010 könnte mit **Windkraftwerken jährlich rund 50 GWh** erzeugt werden; 16 mal mehr als heute. Diese Aussage stützt sich u. a. darauf, dass gemäss neuesten Abklärungen auf Nabenhöhe heutiger Anlagen wesentlich höhere Windgeschwindigkeiten herrschen (über 6 m/s) als bisher angenommen.

Für die Weiterentwicklung von **Kleinwasserkraftwerken** ist die Frage der Zertifizierung des Stroms im geplanten **Elektizitätsmarktgesetz** von entscheidender Bedeutung. Entsprechende Abklärungen sind im Gange.

KERNENERGIE

Ein wichtiges Forschungsgebiet für die **nukleare Sicherheit und Entsorgung** behandelt Lebensdauerfragen von Kernkraftwerkskomponenten. Hier konnten betreffend Rissbildung und -wachstum durch aufwendige Versuche Schwellenwerte für Ermüdungserscheinungen bestimmt werden.

Einen wichtigen Erfolg bei der **kontrollierten nuklearen Fusion** konnte die ETH-Lausanne verzeichnen: Ihr *Gyrotron* – Gerät zur Aufheizung des Plasmas im Reaktor – schaffte einen neuen Weltrekord: 350 kW während 110 Sekunden.

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Im Projekt **Förderung des Exports im Energiebereich** wurde gezeigt, dass im Sektor energieeffiziente Anlagen und Materialien sowie erneuerbare Energie-Technologie bereits heute für rund 600 Mio. Franken pro Jahr Güter aus der Schweiz exportiert werden. Jetzt wird eine Exportförderungsstrategie entwickelt, die das Interesse der Industrie an rationellen oder erneuerbaren Energietechnologien weiter fördern soll.

Un **réacteur solaire de recyclage par voie thermique** a permis de réaliser, en première mondiale, l'extraction du plomb et du zinc métalliques à partir de poussières de filtres, à des températures comprises entre 1200 et 1300 °C.

Quant au projet P+D **Green Gas – du biogaz comme carburant**, il conduit à réaliser au moins une installation nouvelle de production ou de stockage par année. Jusqu'en 2005 ce sont 50% du biogaz obtenu industriellement – c-à-d. 6000 t/an – qui devront être mis à disposition comme carburant.

Le **savoir-faire** en recherche et en mise en pratique des firmes de conseil suisses dans le domaine de la **géothermie** est très demandé sur le plan international. Des mandats ont été confiés à des entreprises suisses, provenant cette année d'Autriche, des Pays-Bas, d'Allemagne, de France, de Grèce et du Japon. Pour ce qui est de la Suisse, il faut noter la réalisation d'installations munies de pieux échangeurs au nouveau *Dock Midfield* de l'aéroport de Zurich.

D'ici 2010 les **installation éoliennes** pourraient produire jusqu'à 50 GWh d'électricité par an, soit 16 fois plus qu'actuellement. Ce pronostic se trouve favorisé par le fait qu'à hauteur de la nacelle de l'éolienne règnent des vents plus rapides qu'on ne le pensait jusque-là (plus de 6 m/s).

En ce qui regarde le développement de la **petite hydraulique**, la question de la certification du courant prévue dans la **loi sur le marché de l'électricité** reste décisive. Des investigations à cette fin sont en cours.

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Un thème important de recherche en **sécurité nucléaire et en gestion des déchets** concerne la question de la durée de vie des composants des centrales nucléaires. La formation et la propagation de fissures ont été examinées et des seuils manifestant le degré de fatigue des composants ont été établis.

Dans le domaine de la **fusion nucléaire contrôlée**, l'EPF-Lausanne a enregistré un important succès : un record mondial a été atteint en ce qui concerne l'énergie délivrée par un *gyrotron* à haute fréquence – l'appareil qui permet le chauffage du plasma – puisqu'on a atteint 350 kW durant 110 secondes.

FONDEMENTS DE L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE

Le projet "**Encouragement de l'exportation dans le domaine énergétique**" montre qu'à ce jour, l'équivalent de 600 millions de francs par an de marchandises a été exporté de Suisse dans le secteur des installations et des matériaux efficaces sur le plan énergétique ainsi que dans celui des technologies liées aux sources d'énergie renouvelables. Une stratégie est en cours d'élaboration pour accroître l'intérêt porté par l'industrie aux technologies rationnelles ou recourant à des énergies renouvelables.

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG IN GEBÄUDEN

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 2000

Markus Zimmermann

mark.zimmermann@empa.ch



Passivhäuser – komfortabel auch ohne Heizung

Im Rahmen des EU-Projekts CEPHEUS wurden auch in der Schweiz Wohnbauten erstellt, die so energieeffizient sind, dass auf ein Heizsystem verzichtet werden kann. Der jährliche Energiebedarf für Wärme liegt bei weniger als 15 kWh und ist somit rund 10 mal niedriger als bei konventionellen Bauten.

Einleitung

Das Programm "**Rationelle Energienutzung in Gebäuden**" fördert den effizienten und umweltschonenden Energieeinsatz im Gebäudebereich, indem es Grundlagen erforscht und die Entwicklungen und Demonstration verbesserter Technologien unterstützt. Dabei werden längerfristig Einsparpotentiale gegenüber konventionellen Gebäuden von 50 – 90 % anvisiert. Der in der Schweiz gut eingeführte **Minergie-Standard** gilt grundsätzlich als Mindestanforderung für Demonstrationsbauten.

Die Ausnutzung der nach wie vor grossen Sparpotentiale im Gebäudebereich ist volkswirtschaftlich von grossem Interesse. Der Gebäudebereich beansprucht rund 60 % des schweizerischen Energieverbrauchs, obwohl nur rund 21 % der schweizerischen Haushaltsausgaben auf ihn entfallen. 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. Der Gebäudebereich ist auch massgeblich verantwortlich für den Ressourcenverbrauch, das Abfallaufkommen und die Umweltbelastung unserer Gesellschaft. Eine nachhaltige Gesellschaft ist nur möglich, wenn auch die Bauwirtschaft und der Betrieb von Gebäuden nachhaltig ausgerichtet sind.

Das Programm befasst sich mit **Gebäudesystemen**, mit der **Gebäudehülle**, mit den **haustechnischen Installationen** und mit **der passiven Nutzung der Sonnenenergie**. Im Vordergrund stehen die Optimierung ganzer Gebäudesysteme und die ganzheitliche Berücksichtigung der Wirkungen auf die Umwelt. Währenddem früher nur die Einsparung oder Substituierung von fossilen Energieträgern Vorrang hatte,

steht heute die Reduktion des Primärenergieverbrauchs und die Minimierung der Umweltbelastung im Vordergrund. Entsprechend setzt das Programm neben der Energietechnik auch einen grossen Akzent auf die Untersuchung der Auswirkungen des Bauens und der neuen Technologien auf die Umwelt.

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

Hochisolationstechnik: Entwicklung und Demonstration neuer platzsparender, 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 sowie als Wohn-, Büro- oder Gewerbebau.

Umwelttechnik: Bereitstellen von Grundlagen, sowie Erarbeitung und Anwendung von praxisnahen Methoden zur ganzheitlichen Beurteilung von Bauten, Systemen und Komponenten.

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

Schwerpunkte für 2000

Das Programm war im Jahr 2000 geprägt durch die Neuorganisation beim BFE sowie durch die Neuausrichtung des Programms für die Periode 2000 bis 2003.

Entsprechend wurden laufende Projekte abgeschlossen und die neuen Schwerpunkte gestartet. Im Vordergrund stand dabei die Ausschreibung des neuen Forschungsprogramms, welches neuerdings auch den Bereich „Solararchitektur“ umfasst. Ausgeschrieben wurden 7 Schwerpunktsthemen, die vorgängig im Rahmen einer Experteneinigung und unter Berücksichtigung des CORE-Forschungskonzepts festgelegt wurden:

- **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**
- Systeme zur **Nutzung von Temperaturkaskaden** und **Abwärme** sowie zur **Energiespeicherung** und **Warmwasserversorgung**
- **Umweltaspekte** des Bauwesens und der Energienutzung
- Grundlagen zur Erhöhung der **Bestellerkompetenz**, Verfahren für Diagnose und Abnahme
- **Bedarfsgeregelte Systeme** zur Einbeziehung des Benutzer- und Betreiberverhaltens

Gefragt waren kurz formulierte Projektideen, die es dem BFE noch ermöglichen, zusammen mit der Programmleitung Korrekturen anzubringen und eine geeignete Projektkoordination vorzunehmen. Die Aus-

schreibung, die ausschliesslich über das Internet erfolgte, konnte erfolgreich durchgeführt werden. Von den ca. 80 Projekteingaben werden rund 50 weiterverfolgt. Ein gutes Dutzend Projekte konnte bereits gestartet werden.

Anzahlmässig am bedeutendsten waren die eingereichten Projektskizzen zu den Bereichen „**Passivhäuser**“, „**Sonnenenergienutzung**“ und „**Umwelttechnik**“, währenddem relativ wenige Eingaben zu „bedarfsabhängiger Regelung“, „Wärmespeicherung / effiziente Warmwasseranlagen“ und „Be-

stellerkompetenz“ eingereicht wurden. Es ist beabsichtigt, eine entsprechende Ausschreibung im Jahr 2002 zu wiederholen.

Parallel zur Ausschreibung wurde mit dem Aufbau der Programmdokumentation im Internet begonnen. Inzwischen können sich Interessierte via Internet über durchgeführte und laufende Projekte informieren und die Forschungsberichte direkt vom Netz herunterladen. Wichtige Schlussberichte können nach wie vor auch in Papierform bezogen werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

UMWELTTECHNIK

Das Programm befasst sich mit den Grundlagen für umweltgerechtes Bauen, mit Bewertungsmethoden, mit der Entwicklung von Instrumenten zur Beurteilung der Auswirkungen auf die Umwelt sowie mit der Verminderung des Verbrauchs grauer Energie.

Zur Aufbereitung und qualitativen Verbesserung der dringend benötigten Ökoinventare konnten diverse Institutionen des ETH-Bereichs unter der Leitung der EMPA zu einem **Zentrum für Ökoinventare** zusammengeschlossen und das ambitionöse Projekt "ECOINVENT 2000" mit der Unterstützung diverser Bundesämter gestartet werden. Das Projekt hat zum Ziel, bis Ende 2002 ein überarbeitetes, harmonisiertes Ökoinventar für Energiesysteme, Investitions- und Konsumgüter, Transporte und Entsorgungsprozesse auf dem Internet zur Verfügung zu stellen. Die Überarbeitung der **Ökoinventare für Energiesysteme** [1] wurden mit Unterstützung des BFE bereits gestartet.

Abgeschlossen werden konnte eine Zusammenarbeit mit der IEA, in welcher die **umweltbezogenen Auswirkungen des Bauens** untersucht [2] wurden. Im Vordergrund stehen methodische Ansätze, die es erlauben, die langfristigen, durch Bauten verursachten Auswirkungen auf die Umwelt zu analysieren. Wesentliche Erkenntnisse wurden auch bezüglich der Umweltbelastung durch Bauabfälle gewonnen [32]. So wurde aufgezeigt, dass bisher als harmlos betrachtete Baustoffe, wie z. B. Gips, die bei der Entsorgung wesentlich mehr Umweltbelastung verursachen als bei der Herstellung.

Auf dem Gebiet der Bewertungsmethoden hat das Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit im Bauwesen (ZEN) am Status-Seminar eine neue Methode vorgestellt, die es ermöglicht, die ökologische Nachhaltigkeit von Bauten abzuschätzen [33]. Erste Auswertungen haben gezeigt, dass auch Bauten nach dem Minergie-Standard die Nachhaltigkeitsziele noch nicht zu erreichen vermögen.

Um Bauwerke und Konstruktionen bezüglich Umweltbelastung beurteilen und optimieren zu können, braucht es entsprechende Planungsinstrumente. Das im Vorjahr fertiggestellte Programm OGIP [3], [34],

welches die **gesamtheitliche Optimierung von Energieverbrauch, Umweltbelastung und Baukosten** zum Ziel hat, konnte mit einer Reihe von Kursen in die Praxis eingeführt werden. Es erlaubt den Planern, nebst der Baukostenberechnung mit wenig Mehraufwand auch eine Analyse der externen Kosten, der Umweltbelastung und des Energieverbrauchs für die Erstellung und den Betrieb von Gebäuden durchzuführen.

Um Erfahrungswerte für die durch das Bauen verursachten Umweltbelastungen zu erhalten, werden gute Bauten analysiert. In einer ersten Auswertung wurden **vier Solarbauten beurteilt** und mit Varianten ohne Sonnenenergienutzung verglichen [35]. Die Untersuchung zeigt, dass einfache, möglichst passive Solarsysteme die Umweltbilanz eines Gebäudes positiv beeinflussen, dass aber aufwendige Anlagen und Wintergärten problematisch sein können. Auch wenn die Energiebilanz von Solarsystemen positiv ist, bedeutet dies nicht unbedingt, dass auch weniger Umweltbelastungen entstehen. Wärmeschutzmassnahmen schneiden diesbezüglich besser ab.

Weitere Kennwerte – und hoffentlich auch Zielwerte – sollen im Rahmen des IEA Projekts **Solar Sustainable Housing** [4] ermittelt werden. Das IEA-Projekt erarbeitet Grundlagen um die Verbreitung nachhaltiger Solarwohnbauten zu fördern, indem es diese besser auf die Marktbedürfnisse abstimmt und die Konzepte optimiert. Dabei geht es auch um die **ökologische Optimierung von Passivhäusern** [5]. Die Kennwerte dieser Gebäude sollen schliesslich im Programm OGIP als Referenzgebäude für ökologisches Bauen zur Verfügung stehen.

Für die frühe Planungsphase und insbesondere für **Architekturwettbewerbe** werden im Projekt **Snarch** [6] Kriterien und Richtlinien für eine umweltbezogene Beurteilung erarbeitet. Die Arbeiten werden durch die Zürcher Hochschule Winterthur zusammen mit rund 20 Projektpartnern (Hochbauämter, Bundesämter, Verbände und Private) durchgeführt. Die Richtlinie sollte Mitte 2001 vorliegen.

Zur Reduktion des Verbrauchs von grauer Energie sollen zukünftig vermehrt auch nachwachsende Roh-

stoffe im Bauwesen einsetzen werden. Mit der Dämmstoffindustrie wurden Versuche für Dämmstoffe aus **Hanf- und Grasfasern** durchgeführt [7]. Beide Rohstoffe sind aus landwirtschaftlicher Sicht interessant und in genügender Menge verfügbar. Vor allem ein chemisches Verfahren, bei dem aus Gras nicht nur Fasern, sondern auch Eiweiss und Alkohol gewonnen wird, hat interessante Ergebnisse geliefert. Das Projekt soll im nächsten Jahr abgeschlossen werden.

PASSIVE SONNENENERGIENUTZUNG / GEBÄUDESYSTEME

Mit der Integration des Programms Solararchitektur in das Gebäudeprogramm bilden Gebäude mit passiver und hybrider Sonnenenergienutzung einen eigenen Schwerpunkt.

Besonderes Gewicht hat dabei das bereits erwähnte IEA-Projekt **Solar Sustainable Housing** [4], das die rationelle Energienutzung, die Nutzung erneuerbarer Energien und Nachhaltigkeitsaspekte optimal aufeinander abstimmen soll. Nicht nur die neuesten Passivhaustechniken werden dafür eingesetzt, auch die bisherigen Erfahrungen aus Solarhäusern sollen einfließen.

Eine Zusammenstellung über **die Erfahrungen mit ca. 60 Solargebäuden** wird zurzeit erarbeitet[8]. Sie soll in übersichtlicher Form die angewendeten Strategien, die Erfahrungen und Messresultate zusammenfassen.

In dieser Zusammenstellung werden auch die Ergebnisse der detaillierten Messungen an einem Zweifamilien-Solarhaus in Oberdorf (BL) sein [9]. Das Gebäude wird teilweise durch **Fenster und Luftkollektoren** auf dem Dach geheizt. Obwohl das System grundsätzlich funktioniert, entspricht die Leistung teilweise nicht den Erwartungen. Vor allem Leckagen und die zu komplizierte Anlage führen zu Ertragsminderungen.

GEBÄUDEHÜLLE

Obwohl die Gebäudehülle einen ausgesprochen traditionellen Gebäudeteil darstellt, werden aufgrund ihrer zentralen Stellung im Energiekonzept weitere Verbesserungsmöglichkeiten gesucht.

Gemäss der neuen, EU-konformen SIA-Norm 180 sind zur Berechnung des Heizenergiebedarfs auch die Wärmebrücken einzubeziehen. Gemeinsam mit der Überarbeitung des bisherigen Bauteilkatalogs wird deshalb auch intensiv an der praxisingerechten Aufbereitung eines **Wärmebrückenkatalogs** [11] gearbeitet. Beide Teile sind so angelegt, dass sie zukünftig auch als Internet-Datenbank zugänglich sein werden.

Der Wettbewerb über **optimierte Unterkonstruktionen hinterlüfteter Fassaden** [12] befasste sich mit neuen Lösungen, die eine kostengünstige und ther-

misch optimierte Aufhängung von Fassadenverkleidungen – auch bei dicken Dämmschichten – ermöglichen. Drei zukunftssträchtige Lösungen wurden prämiert und sollen nun im Rahmen von Pilotobjekten vorgestellt werden.

Hocheffiziente Wärmedämmsysteme [13a], welche die notwendige Dämmdicke massiv (Faktor 5 bis 10) reduzieren, stossen auf ein reges Interesse. Konventionelle Wärmedämmungen mit über 20 cm Dämmdicke sind für viele Anwendungen, insbesondere auch bei Gebäudesanierungen und für Haushaltgeräte wie Kühlschränke ungeeignet. Aufgrund der in der Schweiz durchgeführten Vorarbeiten [13], [14], [15] und realisierten Pilotanwendungen (Speicherisolationen, Fensterverbreiterungen, Türen, Fussbodenheizungen und Innendämmungen) konnte im Rahmen der IEA eine internationale Zusammenarbeit initiiert werden. An einer internationalen Konferenz "High Performance Thermal Insulation Systems" werden anfangs 2001 an der EMPA die Ergebnisse vorgestellt und das IEA-Projekt gestartet.

Im Fensterbereich wurden in den vergangenen Jahren grosse Fortschritte erreicht. Auf dem Markt sind Verglasungen mit U-Werten weit unter 1, bis 0.3 W/(m²·K) verfügbar. Parallel dazu hat sich aber bei Architekten und Bauherren der Trend zu extrem stark verglasten Bauten mit schlechtem Komfort und hohen Kühllasten massiv verstärkt.. Um diesem Problem zu begegnen wurde ein Projekt gestartet, welches einfache **Planungsrichtlinien für stark verglaste Bauten** [16] erarbeiten soll.

Gerade rechtzeitig dazu wurden an der EMPA die Messserie über **Wärmelasten transparenter Bauteile und Sonnenschutzsysteme** [17a] abgeschlossen. Sie zeigen, dass es selbst bei gutem Sonnenschutz schwierig ist, den Wärmegewinn unter 15 % der Einstrahlung zu reduzieren und gleichzeitig den Anforderungen der Tageslichtnutzung zu genügen. Deshalb werden nun die Messungen mit verschiedenen Industriepartnern auf weitere Systeme ausgedehnt und aufgrund der Messungen die Simulationsinstrumente für Sonnenschutzsysteme verbessert [17b].

HAUSTECHNIK

Mit der Herausgabe des Handbuchs für **thermoaktive Bauteilsysteme** [18], [36] wurde eine wichtige Planungsgrundlage für energieeffiziente Bauten bereitgestellt. Bei dieser Technik, die sich für Niedrigenergiebauten eignet, wird das Raumklima durch geringes Beheizen resp. Kühlen der Betondecken konstant gehalten. Nebst hohem Komfort resultieren geringere Investitionskosten und ein tiefer Energieverbrauch. Viele der zurzeit in der Schweiz realisierten Geschäftshäuser werden nach diesem Konzept realisiert.

Diverse Software-Entwicklungen werden zurzeit im Umfeld der Programm-Familie IDEA der HTA-Luzern realisiert. Diese Programm-Familie stellt eine wichtige Plattform für integrale Haustechnikanwen-

dungen dar. Wichtige Entwicklungsarbeiten sind:

- **Harmonisierung der Nutzungsprofile SIA 382/2 und SWKI 95-3** [19a]
- **Kältetool SIA 380/4** zur Bestimmung des Elektrizitätsbedarfs durch Kühlung [19b]
- **Berechnungswerkzeug für den Jahresenergiebedarf von Lüftungsanlagen** [20]
- **Praxisnahe Validierung von Simulationsprogrammen** im Rahmen des IEA Solar Task 22 [21]
- Übersetzung des bestehenden Moduls für den **Kühllastnachweis gemäss SIA 382/4** ins Französische [22]

Für die dezentrale Belüftung von Räumen wurde eine Reihe von **Einzelraumlüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung** untersucht [23]. Sowohl bezüglich Lärm, wie auch bezüglich Wirkungsgrad wurden sehr unterschiedliche Resultate erzielt. Vor allem der Wirkungsgrad der Geräte lässt unter Berücksichtigung aller Verluste zu wünschen übrig. Diese Erkenntnis legt nahe, dass die verfügbaren Geräte sorgfältig auszuwählen sind. Sie werden sich am ehesten für die Verbesserung der Luftqualität in Arbeitsräumen und Besprechungsräumen eignen.

Die Untersuchungen zu **Kanalwärmetauschern** [24] welche die Zu- und Abluft über Doppelrohre führen und so eine effiziente Wärmerückgewinnung ermöglichen, konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Zurzeit soll eine erste entsprechende Demonstrationsanlage realisiert werden. Weiterführende Arbeiten, zur zusätzlichen Nutzung der Abwärme eines Gasheizgerätes im Kanalwärmetauscher, werden zurzeit mit der Unterstützung des FOGA durchgeführt.

Die Arbeiten zur Bestimmung der **Wirksamkeit von Lüftungsanlagen** und deren Wärmerückgewinnung mit Hilfe von Tracergas sind abgeschlossen [25a]. Damit steht nun ein wichtiges, einfaches Diagnoseverfahren im Lüftungsbereich mit entsprechender Auswertesoftware zur Verfügung [37].

Auch das Projekt ATEMAC [25b] befasste sich mit Tracergastechnik. Zur **Diagnose des mittleren Luftwechsels** sollten sogenannte Passivtracer eingesetzt werden. Die Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass dazu keine geeigneten Testgase verfügbar sind.

Die Absorption der Testgase durch Baustoffe verfälscht die Ergebnisse zu stark. Stattdessen wird nun versucht, über die dynamische Änderung der Kohlendioxidkonzentration auf den Luftwechsel schliessen zu können. Die Arbeiten werden 2001 abgeschlossen.

Die im Rahmen einer IEA-Zusammenarbeit durchgeführte Entwicklung von **Methoden zur automatischen Fehlerdetektion in Haustechnikanlagen** wurde planmässig abgeschlossen [26]. Im Vordergrund der schweizerischen Arbeiten stand das automatisierte Auffinden nicht korrekt funktionierender Ventile. Entsprechende Algorithmen sind bereits von der Reglerindustrie übernommen worden. Der Anwendung solcher Methoden sind jedoch Grenzen gesetzt, da die Komplexität der automatischen Fehlererkennung mit der Anzahl zu detektierender Fehler rasch zunimmt und kaum ohne zusätzliche, aufwendige Sensoren auskommt.

Mehr Erfolg verspricht man sich von neuen Regelalgorithmen, die nicht mehr auf physikalischen Zusammenhängen basieren, sondern **neuronale Netzwerke und Fuzzy-Logik** verwenden. Im Vordergrund stehen nicht nur Energieeinsparungen, sondern vor allem eine einfachere Installation und Inbetriebnahme, da der Regler in der Lage ist, sich selber zu optimieren. Mit den im Projekt NEUROBAT [27] durchgeführten Entwicklungen konnten auf Antrieb praktisch durchwegs bessere Resultate erzielt werden als mit einem (optimal eingestellten) herkömmlichen Regler. Ein entsprechender Heizungsregler konnte zusammen mit der Industrie zur Prototypreife gebracht werden und soll demnächst in Pilotobjekten zum Einsatz kommen.

Mit dem Projekt **Temperatur- und Feuchteübertragungsverhalten von Wärmerückgewinnern im Teillastbetrieb** [28] wurden die Kennlinien für Wärmetauscher für den in der Praxis oft relevanten Teillastbetrieb ergänzt. Die Erkenntnisse fliessen in die Planungsgrundlagen für Wärmerückgewinnungsanlagen ein.

Mit den **Abklärungen für ein Prüfrelement für Kompaktlüftungsgeräte** [28] wird eine neue Generation von Energiezentralen erfasst, welche in einem Gerät Heizung, Lüftung und Warmwasser für ein Niedrigenergiehaus bereitstellen.

Nationale Zusammenarbeit

Von den im Jahr 2000 laufenden 35 Forschungsprojekten wurden 10 Projekte mit **Fachhochschulen**, 12 Projekte mit **ETH-Instituten** und 13 Projekte mit der **Industrie** durchgeführt. An 17 Projekten waren planende **Ingenieurbüros** beteiligt und in 4 Projekten wurde mit **Branchenverbänden** zusammengearbeitet.

Vor allem 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 teilweise gemeinsam finanziert. Zudem wird über die

Fachhochschulen die Zusammenarbeit mit der KTI laufend verstärkt.

Am 14./15. September wurde durch das Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit zum 11. Mal das **Status-Seminar der schweizerischen Energie und Um-**

weltforschung an der ETH durchgeführt [38]. Von den 50 vorgestellten Arbeiten sind 32 mit Unterstützung des Bundesamts für Energie realisiert worden. Dies zeigt die Bedeutung der BFE-Programme für Forschung, Entwicklung und Demonstration.

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 und Solar Heating and Cooling*** war die Schweiz im Jahr 2000 an vier Projekten beteiligt.

- *Energy Related Environmental Impact of Buildings*, abgeschlossen [2]
- *Computer-aided Evaluation of HVAC Performance*, abgeschlossen [26]
- *Building Energy Analysis Tools*, demnächst abgeschlossen [21]
- *Optimisation of Solar Use in Large Buildings*, demnächst abgeschlossen [10]

Für die Durchführung von zwei IEA-Projekten im Gebäudebereich stellt die Schweiz die Projektleitung

- *Solar Sustainable Buildings (Solar Heating and Cooling Programme)*, 2000 gestartet [4]
- *High Performance Thermal Insulation Systems (Energy Conservation Programme)*, Start 2001

Im 4. EU-Rahmenprogramm sind noch 12 mit ausländischen Partnern in Brüssel eingereichte Projektanträge hängig. Nur gerade zwei neue Projekte wurden bewilligt:

- *URBVENT: Natural Ventilation in Urban Areas, potential assessment and optimal façade design*
- *IQ-TEST: Improving Quality in Test and Evaluation Procedures of Solar and Thermal Performances of Building Components*

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die Ausschreibung der Forschungsschwerpunkte hat auch auf die neuen Gesuche im P+D-Bereich abgefärbt. Die Umsetzung von Forschungsarbeiten scheint im Gebäudebereich beim **Passivhaus-Standard** am weitesten fortgeschritten zu sein. Seit Mitte 2000 wurden fünf Projekte im Passivhaus-Standard eingereicht, wobei alle Projekte Mehrfamilienhäuser darstellen, eines sogar mit Gewerbeanteil und eines als Sanierung.

Erfreulicherweise wurden fast nur noch Gesuche für Mehrfamilienhäuser und Gewerbebauten eingereicht. Die Bereitschaft, neue Technologien anzuwenden ist deutlich gestiegen, vor allem dann, wenn ehrgeizige Vorgaben wie der Passivhausstandard konsequent angestrebt werden. Die Diskussion über die verschiedenen Energieabgaben, welche das Schweizer Volk an der Urne verwarf, mag zu einer Sensibilisierung beigetragen haben. Ausschlaggebend für verantwortungsbewusste Planer und Bauherren neue Lösungen zu suchen, wird jedoch der stark gestiegene Heizölpreis gewesen sein..

In Zürich konnte mit der Sanierung der Überbauung Wehntalerstrasse 474 – 501 der Genossenschaft Waid-matt, ein grösseres Projekt in Angriff genommen werden. Rund **60 Wohnungen werden so saniert** und mit einer kontrollierten Wohnungslüftung

ausgerüstet, dass sie den **Minergie-Standard** für Sanierungen erfüllen. Im Herbst 2002 wird das Projekt abgeschlossen.

Das **Niedrigenergiehaus Nordmann** in Erlenbach erfüllt den Minergie-Standard. Ausgerüstet mit einer kontrollierten Wohnungslüftung und kombiniert mit einer Luftheizung eignet es sich sehr gut als Messobjekt, da ein Vergleichsobjekt gleicher Art daneben erstellt wurde. Die Bauhülle besteht aus hochisolierendem Einsteinmauerwerk, welches erstmals für ein Niedrigenergiehaus verwendet wurde. Im Sommer 2001 wird das Messprojekt abgeschlossen.

Da das BFE-Programm Solararchitektur ins Programm Gebäude integriert wurde, finden sich nun auch neu Projekte aus diesem Bereich. **TWD-Fassadenelemente mit integriertem Latentspeicher und Sonnenschutz** werden an einem Neubau in Ebnet-Kappel realisiert. Nach der Entwicklung des Latentspeichers wird das Speicherelement an diesem Solarhaus eingesetzt und zusätzlich an der EMPA im Solarprüfstand ausgemessen. Im Sommer 2002 wird der Schlussbericht vorliegen.

Mit der **Integration einer konvektiven Fassade in ein Heimatschutzobjekt** wird in Herisau gezeigt, dass auch in Bauzonen mit erhöhten architektoni-

schen Ansprüchen Kollektoren und Photovoltaik integriert werden können. Gegenwärtig wird eine Erfolgskontrolle durchgeführt.

In der **Ökosiedlung Melchrüti** in Wallisellen mit 62 Wohneinheiten wurde ein Messprojekt gestartet. Erste Resultate zeigen, dass der Qualitätssicherung bei der Bauausführung zu Recht höchste Priorität beigegeben wurde. Die Kombigeräte für Lüftung/Luftheizung und Warmwasser erfüllen die Planungswerte weitgehend. Bei der Steuerung wurde ein Optimierungspotential ausgemacht. Die Erfolgskontrolle wird dazu genutzt, die Anlagen weiter zu optimieren.

Ein **Mehrfamilienhaus** an der Rychenbergstrasse in Winterthur mit sechs **Wohnungen unterschreitet den Passivhausstandard** klar [30]. Aufgrund des geringen Heizenergiebedarfs erfolgt die Wärmebereitstellung vorwiegend mit einer 60 m² grossen Luftkollektorfassade. Die erwärmte Luft wird in einer optimierten Kaskade zuerst dem Warmwasser, dann den Hypokaustenböden und anschliessend direkt der kontrollierten Lüftung zugeführt. Die Restwärme von 8 kWh/m²a wird von einem Holz-Pellet-Kessel (12 kW) bereitgestellt. Die Messungen dauern bis im Frühjahr 2001.

Die Reihenhaussiedlung in Nebikon wird ausgemessen. Die Häuser in Holzbauweise sind rein passiv beheizt und haben ihre Praxistauglichkeit bewiesen. Mit weniger als 15 kWh/m²a erfüllen sie die Anforderungen des europäischen **Passivhaus-Standards**. Im Jahr 2000 konnten im Rahmen des EU-Projekts *CE-PHEUS* die Verbrauchsmessungen durchgeführt werden. Zwischenergebnisse liegen vor, der Schlussbericht wird im Sommer 2001 vorliegen.

Das Projekt **Doppelpfarrhaus** am Birkenweg in **Hochdorf** konnte abgeschlossen werden. Dabei wurde die Einbindung eines schweren Speicherofens in die kontrollierte Lüftung messtechnisch untersucht [39].

Gestartet wurden zwei weitere Projekte mit der Einbindung eines Holzofens in das Lüftungskonzept. Dies ist insofern interessant, als der Wärmebedarf

unter 4 kW liegt, Holzheizungen jedoch oft eine deutlich höhere Höchstleistung erbringen. Wie also regeln? Das **Projekt Jurt in Hüenberg** regelt die Wärmeabgabe des Ofens über die Raumtemperatur. Bei den Projekten **Jurt in Hüenberg** und **Grasswil** [31] wurde aufgrund der Erfahrungen in Hochdorf der Umluftteil von der mechanischen Wohnungslüftung abgetrennt. Die Wärmeabgabe erfolgt durch die direkte, bedarfsgeregelte Luftführung durch den massiven Ofen. Die **Sanierung** der Überbauung Chemin des Libuelles in Lausanne wurde fertiggestellt und wird bis Frühjahr 2000 von einer Messkampagne begleitet. Der Schlussbericht des Projekts *Ventilation contrôlée à débit minimal dans un immeuble rénové* [40] zeigt auf, was bei der Realisierung von Wohnungslüftungen in der Westschweiz wichtig ist. Nicht die energetischen Probleme stehen im Vordergrund, sondern Komfortfragen (Schallschutz, Zugerscheinungen), bautechnische Probleme (Platzprobleme, Brandschutz) und Kosten. Mit den Messungen konnte die Akzeptanz von Wohnungslüftungen in der Westschweiz erhöht werden. Die **Erfolgskontrolle Wohnungslüftung und Wohnkomfort** bei Mehrfamilienhäusern in Dällikon ZH zeigt, dass die Bewohner in der Deutschschweiz die Heizenergieeinsparung erste und den Komfortaspekten erst zweite Priorität einräumen [41].

Der Geschäftsneubau von Basler & Hofmann in Esslingen demonstriert **innovative Technologien und nachhaltiges Bauen** an einem modernen Bürobau [29] [42]. Im Vordergrund stehen die Erfahrungen mit Quellluftsystemen, Luftansaug-Erdregistern, intelligenter Regelung und Steuerung sowie adaptiver Tageslicht- und Sonnenschutzsysteme. Die Untersuchungen sind abgeschlossen und wurden im Jahr 2000 ausführlich publiziert [42].

Das Projekt **Flüssigkeitserdregister zur direkten Klimakühlung** eines Teils der Büros in Wohlen wurde abgeschlossen. Das Projekt zeigt die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen für die Nutzung des Erdreichs für eine kostengünstige Spitzendeckung im Sommer. Erstaunlicherweise regeneriert sich das Erdreich relativ rasch [43].

Bewertung 2000 und Ausblick 2001

Trotz der Ablehnung der Energievorlagen im Herbst 2000 hat sich bezüglich effizienter Energienutzung einiges getan.

Der Minergie-Standard, der den Energieverbrauch von Gebäuden weit mehr als halbiert, hat sich in breiten Kreisen durchgesetzt. Er gilt heute als realistischer Zielwert für wirtschaftliches und zeitgemässes Bauen. Er stellt deshalb auch die Minimalanforderung für alle vom Bund unterstützten Demonstrationsgebäude dar.

Allerdings wurde die Schweiz durch die Verbreitung

des Passivhausstandards, vor allem in Deutschland und Österreich, geradezu überrumpelt. Der Passivhausstandard senkt den Energieverbrauch soweit, dass auf ein eigentliches Heizsystem verzichtet werden kann. Die Mehrkosten durch die energieoptimierte Bauweise können so durch die Einsparungen beim Heizsystem praktisch wieder kompensiert werden. Die Erfahrungen mit ca. 800 gebauten Häusern und Wohnungen sind so gut, dass sich bereits ein Markt für eine neue Generation hervorragender Konstruktionen, Komponenten und Apparate bilden konnte. In den nächsten Jahren sind deshalb viele

neue Impulse für die Energieeffizienz im Gebäudebereich zu erwarten.

Mit dem Projekt *CEPHEUS*, mit der Leitung des IEA-Projekts „*Solar Sustainable Buildings*“ und „*High Performance Thermal Insulation*“ hat die Schweiz den Anschluss an diese Entwicklung gefunden. Bereits sind diverse neue Passivbauten, vor allem Mehrfamilienhäuser und sogar eine Passiv-

Gebäudesanierung geplant. Im Januar 2002 soll die europäische Passivhaustagung in der Schweiz (Basel, Swissbau) stattfinden.

Generell ist es mit der Ausschreibung der Programmschwerpunkte gelungen, in verschiedenen Bereichen neue Initiativen zu ergreifen und die Zusammenarbeit national und international zu verbessern.

Liste der Projekte

(JB) Jahresbericht 2000 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

- [1] R. Dones (roberto.dones@psi.ch), PSI, Villigen: *Ecoinvent 2000 – Ökoinventare für Energiesysteme* (JB)
- [2] A. Lalive (alalive@bhz.ch), ETH-Zürich: *IEA/BCS Annex 31: Energy Related Environmental Impact of Buildings* (SB)
- [3] H.-P. Goeggel (hp.goeggel@crb.ch), CRB, Zürich: *OGIP '98: Optimierung von Gesamtanforderungen für Energieverbrauch, Umweltbelastung und Baukosten* (SB)
- [4] R. Hastings (robert.hastings@freesurf.ch), AEU, Wallisellen: *IEA/SHC Task 28: Nachhaltige Solar-Wohnbauten* (JB)
- [5] A. Lalive (alalive@bhz.ch); Basler&Hofmann, Zürich: *Ökologische Optimierung von Solargebäuden über deren Lebenszyklus (Beteiligung IEA/SHC Task 28)*
- [6] W. Ramseier (ra@adp-architektur.ch), ZHW, Winterthur: *Standards zur Beurteilung von Nachhaltigkeitsaspekten im Architekturwettbewerb (Snarch)*
- [7] J.-L. Hersener (hersener@pop.agri.ch), Ingenieurbüro, Wiesendangen: *Einblasdämmstoff aus Faserhanf und Altpapier* (JB)
- [8] Y. Kaiser (sonnenarchitektur@energienetz.ch), Kaiser & Partner, Winterthur: *Solargebäude – Strategien und Erfahrungen des energieoptimierten Bauens* (JB)
- [9] M. Blatter (max.blatter@energie-atlas.ch), Energieingenieur, Münchenstein: *Messprojekt MFH Holiger, Oberdorf BL* (SB)
- [10] P. Jaboyedoff (sorane@worldcom.ch), Sorane, Lausanne: *IEA/SHC Task 23: Optimisation of solar energy use in large buildings* (JB)
- [11] Th. Kersten (thorsten.kersten@infomind.ch), infomind gmbh, Zürich: *Wärmebrücken-Atlas WBB 2000* (JB)
- [12] A. Binz (a.binz@fhbb.ch), FH-Basel, Muttenz: *Thermisch optimierte Unterkonstruktionen für hinterlüftete Fassaden* (JB)
- [13] H.-P. Eicher (hanspeter.eicher@eicher-pauli.ch), EICHER & PAULI, Liestal: *a) Realisierung von Demoprojekten mit Vakuum-Dämmelementen* (SB) • *b) Sanierung von einfach- und doppelverglasten Fenstern* (SB)
- [14] R. Weber (robert.weber@empa.ch), EMPA, Dübendorf: *Vorabklärung zur Herstellung hochisolierender Leitungen* (JB)
- [15] M. Damani/U.Vogt (ulrich.vogt@empa.ch), EMPA, Dübendorf: *Vorabklärung zur Herstellung hochisolierender Keramik-Dämmstoffe* (JB)
- [16] C.U. Brunner (Conrad.U.Brunner@cub.ch), Büro CUB, Zürich: *Richtlinie für Gebäude mit hohem Glasanteil* (JB)
- [17] H. Simmler (hans.simmler@empa.ch), EMPA-Dübendorf: *a) Wärmelasten transparenter Bauteile und Sonnenschutzsysteme* (SB) • *b) Messung und Simulation von transparenten Bauteilen mit Sonnenschutz (Beteiligung IEA Solar Task 27)* (JB)
- [18] M. Koschenz (markus.koschenz@empa.ch), EMPA-Dübendorf: *Planungshilfsmittel für thermoaktive Bauteilsysteme* (SB)
- [19] 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)

- [20] 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)
- [21] G. Zweifel (gzweifel@hta.fhz.ch), HTA, Luzern/Horw: *IEA/SHC Task 22: Validierung von Simulationsprogrammen* (JB)
- [22] 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)
- [23] H. Manz (Heinrich.manz@empa.ch), EMPA-Dübendorf: *State of the art von Einzelraumlüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung* (SB)
- [24] H. Huber (hjhuber@hta.fhz.ch), HTA-Luzern: *a) Luftkanal-Wärmetauscher* (SB) • *b) Luftheizung mit Holzofen bei einer EFH-Sanierung* (JB)
- [25] C. Roulet (Claude.Roulet@epfl.ch), EPF-Lausanne: *a) MÉDITA, Méthode de diagnostique des installations de traitement d'air* (SB) • *b) ATEMAC, Application des traceurs passifs pour l'étude des mouvements d'air et de contaminants* (JB)
- [26] P. Gruber (GruberP@ch.sibt.com), LANDIS & STÄFA, Zug: *IEA/BCS Annex 34: Fehlerdetektion- und Diagnosemethoden* (SB)
- [27] J. Kraus (jens.krauss@csem.ch), CSEM Neuenburg / C. Oberholzer, SAUTER, Basel: *Neurobat, Neuro-fuzzy-Heizungsregler* (SB)
- [28] R. Furter (rfurter@hta.fhz.ch), HTA, Luzern/Horw: *Ausarbeitung eines Prüffreglements für Kompakt-Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung und/oder Wärmepumpe* (SB) • *Temperatur- und Feuchteübertragungsverhalten von Wärmerückgewinnern im Teillastbetrieb* (SB)
- [29] Ch. Filleux (chfilleux@BHZ.ch), Basler + Hofmann, Zürich: *Demonstration innovativer Technologien und nachhaltigen Bauens am Geschäftshaus Esslingen* (SB); *Planungsrichtlinie für solare Luftheizsysteme*
- [30] A. Gütermann (amena.ag@energienetz.ch), amena ag, Winterthur: *Messprojekt "Mehrfamilien-Passivhaus mit solarem Luftsystem"* (JB)
- [31] J. Bienz (juerg.bienz@chiquet-sopra.ch), Chiquet-Energetechnik, Ormalingen: *Messprojekt Grasswil* (JB)

Referenzen

Bezug der referenzierten Publikationen soweit nicht anders vermerkt: EMPA ZEN (ZEN@empa.ch), 8600 Dübendorf

- [32] G. Doka, Zürich: *Ökoinventar der Entsorgungsprozesse von Baumaterialien*
- [33] H.-J. Althaus et al, EMPA-Dübendorf: *Zur Messbarkeit von Nachhaltigkeit – ZEN-Standard für ökologisch nachhaltiges Bauen*, tec21, Heft 47, November 2000
- [34] Schweiz. Zentralstelle für Baurationalisierung, CRB, Zürich: *OGIP Beta-Version 4.0: Optimierung der Gesamtanforderungen Kosten, Energie, Umwelt*, Januar 2001
- [35] D. Gerber, Metron AG / A. Haas, EMPA-Dübendorf: *Vergleichende Ökobilanz von Niedrigenergiehäuser mit und ohne solarer Heizunterstützung*, April 2000
- [36] M. Koschencz / B. Lehmann, EMPA, Dübendorf: *Thermoaktive Bauteilsysteme tabs*, Juli 2000
- [37] C. Roulet et al, EPF-LESO, Lausanne: *MEDITA – Methode zur Diagnose von Luftaufbereitungsgeräten, Version 2.0*, Mai 2000
- [38] M. Zimmermann / H. Bertschinger, EMPA, Dübendorf: *II. Schweizerisches Status-Seminar: Energie- und Umweltforschung im Bauwesen*, ETH Zürich September 2000
- [39] I. Langenick, Hochdorf: *Doppeleinfamilienhaus am Birkenweg in Hochdorf*, Dezember 2000
- [40] L. Keller, Lavigny: *Ventilation contrôlée à débits minimal dans un immeuble rénové*, juillet 2000
- [41] D. Gerber, Metron AG, Brugg: *Erfolgskontrolle Wohnungslüftung und Wohnkomfort*, Dezember 2000
- [42] Ch. Filleux, Basler + Hofmann, Zürich: *Geschäftshaus Esslingen*, Gebäudetechnik 5/2000
- [43] M. Lehmann, Wohlen: *Flüssigkeitserdregister zur direkten Klimakühlung*, Dezember 2000

VERKEHR UND AKKUMULATOREN

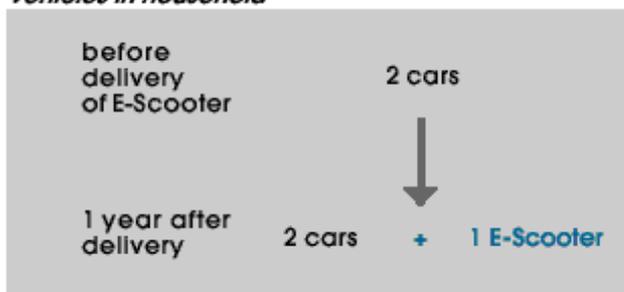
Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 2000

Martin Pulfer
martin.pulfer@bfe.admin.ch

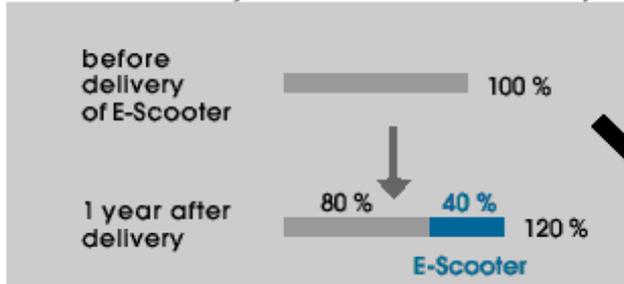
THE IMPACTS OF ELECTRIC TWO WHEELERS ON THE INDIVIDUAL MOBILITY BEHAVIOUR

Swiss investigations in the context of the EU-Project "E-TOUR"
(Electric Two Wheelers on Urban Roads).

vehicles in household



kilometers driven by all motor vehicles: an example



less impacts
in spite of more
kilometers driven!

environmental impacts



EU-Projekt E-Tour

Der Einfluss von Elektrozweirädern aufs Mobilitätsverhalten in europäischen Städten: Rom, Barcelona, Brüssel, Rotterdam, Stockholm, Erlangen, Capri, Mykonos, Basel, Mendrisio und Partnergemeinden.

Programmübersicht und Programmziele

Mit einem Anteil von einem Drittel am gesamten Energieverbrauch stellt der Verkehr die grösste Verbrauchergruppe in der Schweiz dar (Abb. 1).

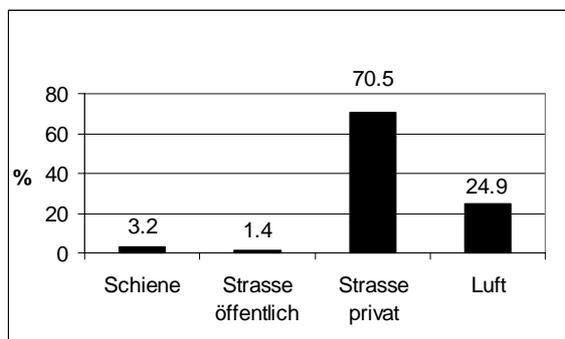


Abb.1: Anteil verschiedener Verkehrsträger am totalen Energieverbrauch des Verkehrs 1995; Quelle: Bundesamt für Statistik (BFS)

Der Energieverbrauch der privaten Strassenverkehrs geht dabei zu 74% zu Lasten von Personenwagen (Abb. 2).

Das Programm Verkehr des Bundesamts für Energie (BFE) erforscht und erprobt Ansätze und Massnahmen zur Absenkung des Energieverbrauchs im Verkehr, insbesondere beim Hauptverbraucher, dem Individualverkehr. Zusätzliche Ziele und Themen, die bei der Ausrichtung berücksichtigt werden, sind auch: Reduktion der Umweltbelastung (inkl. Lärm), Sicherheit, Förderung des Industriestandorts Schweiz, der Bildung und der Wissenschaft.

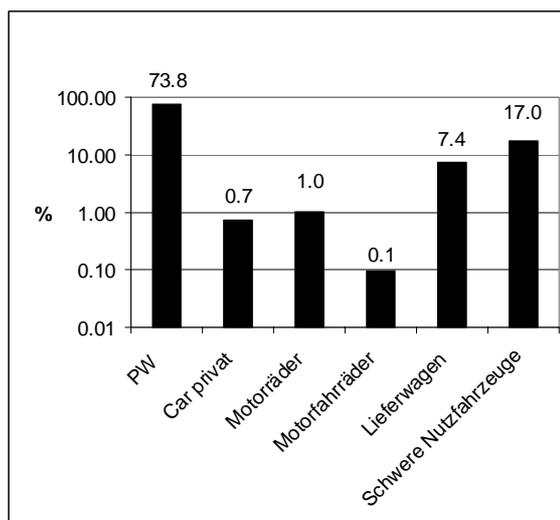


Abb.2: Aufteilung des Energieverbrauchs des privaten Strassenverkehrs 1995; Quelle: BFS

Eine Verringerung des Energieverbrauchs beim Individualverkehr kann dabei vor allem mit folgenden Ansätzen verfolgt werden:

- Leichtere Fahrzeuge,
- Kleinere Fahrzeuge und Karosserien,
- Effizientere Antriebssysteme und -ketten,
- Verhalten des Besitzers (Wahl des Verkehrsmittels, Kauf eines Fahrzeuges, Fahrverhalten, Besetzungsgrad, etc.)

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

GRUNDLAGENDATEN

Erstmals seit 1994 wurde im Auftrag des Amts für Raumentwicklung (ARE) und des BFS ein Mikrozensus *Verkehrsverhalten 2000* durchgeführt. Im Rahmen dieser repräsentativen gesamtschweizerischen Umfrage wurden ca. 29'000 Personen in 27'000 Haushalten über ihr Verkehrsverhalten befragt. Die erhobenen Daten werden nach verschiedenen Kriterien ausgewertet: Verkehrsmittelbesitz, Verkehrsaufkommen, Verhalten, Verkehrszweck, Mobilität und Lebenszyklus, Räumliche Aspekte der Mobilität, Verkehrsentwicklung und verkehrspolitische Aspekte. Die Ergebnisse werden 2001 publiziert und stellen wichtige Grundlagen für die Verkehrs- und Energiepolitik wie auch für die entsprechenden Forschungsprogramme dar.

LEICHTBAU

Das 1995 gestartete Gemeinschaftsprojekt **Modultec** [1] von Horlacher in Möhlin und Esoro in Fällanden

erforschte die Vorteile einer modularen, selbsttragenden Kunststoffkarosserie und wurde im Berichtsjahr erfolgreich abgeschlossen. Das Vorhaben wird mit dem noch industrienäheren Projekt **Modultec II** [1] fortgesetzt. Ein Hauptziel ist dabei die enge Zusammenarbeit mit der Schweizer Automobilzulieferindustrie und deren Materiallieferanten. Die Funktionsmodelle der Leichtbau-Module werden so entwickelt, dass sie den Qualitätsansprüchen der Automobilindustrie genügen.

Die Haupttätigkeiten richteten sich im Berichtsjahr vor allem auf die Herstellung der kompletten Baugruppe *Bodenmodul*, die für verschiedene Antriebskonzepte, wie Elektro-, Brennstoffzellen- oder Pressluftantrieb, ausgelegt wurde. Als weiteres Bauteil wurde ein Dachmodul erarbeitet, das seinerseits einige Komfort- und Funktionsmodule enthält.

Die Fertigung konnte bei kürzeren Taktzeiten weiter optimiert werden. Verschiedene Funktionen werden jeweils in einem Bauteil zusammengefasst und

integriert. Auf diese Weise lässt sich die Anzahl Komponenten verringern und die Fabrikation des eigentlichen Fahrzeuges vereinfachen (lean production).

Für das Folgejahr ist die Herstellung weiterer charakteristischer Bauteile, wie ein hinteres Seitenmodul – mit Integration in einen Serienwagen – vorgesehen. Die einzelnen Module werden in Zukunft mehrere Funktionen und Aufgaben, wie Belüftungssystem, Bordelektrik, Komfortfunktionen, strukturelle Sicherheit und Design, bei gleichzeitiger Gewichtseinsparung übernehmen. Vom Bodenmodul sollen mehrere Varianten für verschiedene Fahrzeugklassen ausgelegt werden.

Die Module resp. die gesamte Karosserie müssen nicht mehr lackiert werden, da die Teile bereits im endgültigen Finish der Form entnommen werden können. Das Gleiche gilt für die Innenseite: Die Veloursstoffe werden direkt beim Pressen aufkaschiert. Dadurch resultiert bei der Fertigung eine verringerte Umweltbelastung und eine kleinere Abfallmenge. Ausgewählte Bauteile werden so bereits in Kleinstserien hergestellt. Dem künftigen Recycling wird der Formen eine grosse Beachtung geschenkt, indem die Sandwichstruktur (Schaumkern bis Deckschichten) aus einem Material gefertigt wird. Dadurch kann ein Bauteil am Schluss des Lebenszyklus durch eine thermische Aufbereitung der Wiederverwendung zugeführt werden.

EFFIZIENTE ANTRIEBE

Das **Palos I** Projekt [2] der ETH Zürich wurde im Jahr 2000 abgeschlossen. Eine Tagung Mitte September diente zur Präsentation der Resultate und wurde von Vertretern der in- und ausländischen Automobilbranche und von anderen interessierten Institutionen sehr gut besucht. Die Resultate stiessen auf grosses Interesse, was sich auch in der Tages- und Fachpresse niederschlug. Zwei von vier Promotionsarbeiten liegen schon vor; die restlichen zwei folgen im Frühling 2001. Dann wird auch ein Sammelband mit allen Resultaten zur Verfügung stehen. Die wesentlichen Resultate der einzelnen Projekte werden nachfolgend kurz zusammengestellt:

Mit einem Berechnungstool können sämtliche verbrauchsrelevanten Grössen bereits im Auslegungsstadium eines neuen Motors berechnet werden. Dies schliesst auch das Klopfverhalten mit ein, so dass verbrauchsoptimale Zündkennfelder im Voraus berechnet werden können. Mehrere Varianten eines Downsizing Motors wurden vollständig durchgerechnet und verglichen. Unter einem Downsizing Motor versteht man einen Motor mit kleinerem Hubraum als der Referenzmotor, der jedoch aufgeladen werden muss, um die benötigten Spitzendrehmomente erbringen zu können.

Für den Temperaturhaushalt eines Verbrennungsmotors wurden dynamische Modelle hergeleitet. Dabei wurde grossen Wert auf die spätere Übertrag-

barkeit von Modell in die Praxis gelegt. Mit Hilfe eines elektrisch betätigten Thermostatventils und einer elektrisch angetriebenen Wasserpumpe konnte sodann eine modellbasierte Steuer- und Regelungsstrategie umgesetzt werden, die es einerseits ermöglicht, den Motor schneller auf seine optimale Betriebstemperatur zu bringen und andererseits die Betriebstemperatur zusätzlich noch zu erhöhen. Aus diesen Massnahmen resultiert bei einem NEFZ-Zyklus (Neuer europäischer Fahrzyklus) eine Verbrauchersparnis von ca. 3%. Physikbasierte Modelle von Druckwellenladern sind das Schlüsselement für die Beherrschung dieser anspruchsvollen Aufladeorgane. Um später eine modellbasierte Steuerung und Regelung für das Aufladesystem zu realisieren sind jedoch einfache und damit schnelle Modelle nötig. Modelle, die diesen Anforderungen genügen wurden hergeleitet und am Prüfstandsmotorsystem verifiziert.

Kontinuierlich verstellbare Getriebe stellen eine weitere Möglichkeit dar, den Verbrauch von Fahrzeugen zu reduzieren. Die bis anhin verwendeten Modelle und Regelungsstrategien sind sehr heuristischer Natur und berücksichtigen insbesondere den Wirkungsgrad des CVT (stufenloses Getriebe) nicht. Um hier Abhilfe zu schaffen wurden detaillierte dynamische Modelle für Motor und Getriebe hergeleitet, die mit Methoden der optimalen Regelung verarbeitet wurden. Die resultierenden verbrauchsoptimalen Trajektorien wurden anschliessend in eine neue Steuerstrategie umgesetzt, die eine Verbrauchsenkung von ca. 4% erzielt.

Im Zentrum der Anstrengungen standen im Berichtsjahr die Vorbereitungen für das Projekt **Palos II** [2] der ETH-Zürich das am Beispiel eines kleinen aufgeladenen Benzinmotors folgende Hauptziele verfolgte:

- Theoretische Arbeiten bezüglich Motor, Antriebsstrang, Emissionen und gezielte Verbesserungsmaßnahmen am Motor realisieren (konstruktiv, systemtechnisch),
- Konzeption verbrauchsgünstiger neuer Aufladekonzepte für Ottomotoren, Modellierung und experimentelle Überprüfung eines neuen Ansatzes,
- Ansätze zur Teilrekuperation in der Theorie erarbeiten und experimentell absichern, Absenkung des Energieverbrauchs durch Optimierung der Nebenaggregate,
- Modellierung und erste Ansätze einer optimalen Regelung eines Antriebsstranges mit stufenlosem Getriebe (CVT-Getriebe) erarbeiten und durch HIL- Simulation experimentell überprüfen,
- Unterstützung des SAVE-Projekts, insbesondere dessen industrielle Umsetzung.

Die Arbeiten erbrachten folgende Hauptresultate:

- (a) Ein neuartiger Ansatz zur Steuerung / Regelung des Kühlsystems eines DSC-Motors wurde entwickelt.

(b) Die Validierung des Druckwellenladermodells erbrachte eine sehr gute Übereinstimmung. Da das Modell einfacher ist als alle bisher bekannten Ansätze, kann es in der Regelungstechnik sehr gut angewendet werden.

(c) Lösung der Optimierungsaufgabe für das CVT-Steuerungsproblem

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind mit diversen Publikationen veröffentlicht worden, wobei insbesondere die vier SAE-Papers zu erwähnen sind.

Das **Palos II** Projekt [2] wurde Mitte Jahr gestartet. Es übernimmt von seinem Vorgänger die Schwerpunktthemen **Aufladung** und **Nebenaggregatemanagement**. Die Untersuchungen in Palos I haben gezeigt, dass diese zwei Gebiete für die Senkung des Kraftstoffverbrauchs mittelfristig am vielversprechendsten sind. Auf Grund der Resultate, die im Vorgängerprojekt erzielt wurden, konnte mit der Robert Bosch GmbH ein Industriepartner für das Projekt gefunden werden, der einerseits ein grosses Interesse an modellbasierten Strategien hat, andererseits bei der Bereitstellung von Komponenten, Komponentendaten und Versuchsträgern grosses Potential hat.

Beim Thema **Aufladung** geht es um die Möglichkeit den Kraftstoffverbrauch im realen Fahrbetrieb zu senken, indem ein Downsizing Motor verwendet wird. Für die Aufladung kommen Abgasturbolader, mechanische Lader und Druckwellenlader in Frage. Im Hinblick auf kleine, leichte Fahrzeuge ist der Druckwellenlader besser geeignet, da er deutlich weniger Spaltverluste als ein entsprechender Abgasturbolader aufweist und zudem in der Dynamik (Fahrverhalten) Vorteile zeigt. Andererseits stellt er von der Steuerung und Regelung her höhere Anforderungen. Die Gegenüberstellung von Abgasturbolader und Druckwellenlader und damit verbunden die Bereitstellung von robusten Steuerungs- und Regelalgorithmen für den Druckwellenlader sind Projektziele. Dafür wurde ein VW 1.0 l Gol Motor angeschafft, der serienmässig mit einem Abgasturbolader versehen ist und so für die Vergleichsuntersuchungen einen idealen Versuchsträger darstellt. Dieser wird vorerst in der Serienkonfiguration gründlichst ausgemessen, bevor er dann mit einem Druckwellenlader der Firma Swissauto-Wenko AG umgerüstet wird.

Die Einführung des 42 V Bordnetzes verbunden mit der Entwicklung von leistungsfähigen, effizienten Alternatoren ermöglicht das nicht nur den in den letzten Jahren aus Komfortgründen stetig gestiegenen Bedarf an elektrischer Energie im Fahrzeug zu befriedigen, sondern auch die zusätzliche Elektrifizierung von weiteren **Nebenaggregaten**. Der Ersatz von bisher riemengetriebenen durch elektrische Nebenaggregate ermöglicht eine komplett neue Auslegung der Aggregate, da die Drehzahl dieser Komponenten nun nicht mehr an die Motordrehzahl gekoppelt ist. Die Aggregate können jetzt beliebig zu- und abgeschaltet werden und laufen immer in ihrem optimalen Betriebsbereich. Dies führt

trotz verbessertem Komfort zu einer Absenkung des Kraftstoffverbrauchs. Die grosse Zahl von Freiheitsgraden beim Betrieb der verschiedenen Aggregate erfordert jedoch eine systematische Optimierung und darauf folgend eine Umsetzung der optimalen Trajektorien in eine im Fahrzeug anwendbare Strategie. Diese Aufgaben werden mit dynamischen Modellen und Tools, die sich schon im Vorgängerprojekt bewährt haben, gelöst.

BRESA, italienisch Brise [3]: Das PSI entwickelt in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich, der EPF Lausanne, der FH Bern / Biel, der Firma Montena (Rossens) und der Deutschen Automobilindustrie ein familientaugliches Fahrzeug mit Brennstoffzellen-Energiewandler und Supercap-Zwischenspeicher. Das Projekt ist in mehrere Themengebiete unterteilt:

Auf der Ebene der **Membran für die Brennstoffzelle** wurde im Rahmen einer Dissertation versucht, neue und kostengünstigere Monomere für die Pflöpfung zu finden. Die bisher synthetisierten Monomere müssen nun radikalisch polymerisiert werden. Gleichzeitig wurde der Effekt von stickstoffhaltigen Additiven auf die Pflöpfung untersucht. Einige dieser Additive erzielen den positiven Effekt eines hohen Pflöpfgrads. Die PSI-Membrane wurde in 30 cm²-Zellen getestet und ist vergleichbar mit der Nafion-Membran 112.

Im Berichtszeitraum wurde ein Stapel mit einer Nennleistung von 6.5 kW aufgebaut und getestet (Abb. 5). Bei diesem Stapel, der in Zusammenarbeit mit der ETHZ (Zentrum für Produktentwicklung) entwickelt wurde, steht die Anwendung von kostengünstigen Fertigungsverfahren sowie die Steigerung der Leistungsdichte im Mittelpunkt.

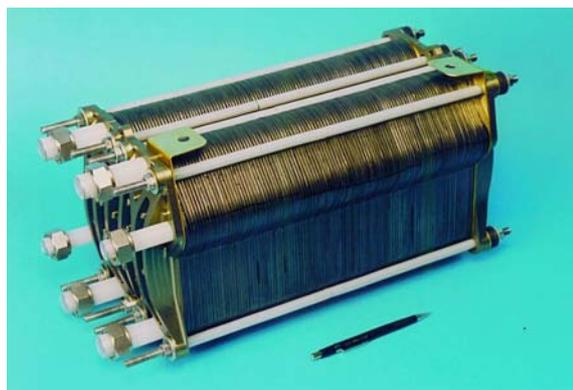


Abb. 5: 6.5 kW Stapel (100 Zellen, Leistungsgewicht 3 kg/kW)

Für die **Supercaps** wurden Elektroden entwickelt, die ihre Eigenschaften durch den Wickelprozess nicht verlieren und eine gute Energiespeicherdichte aufweisen. Es wurden zwei Beschichtungsläufe durchgeführt. Die Leistungsdaten dieser Zellen lauten: Kapazität = 800 F, bei 2.5 V. Umgesetzt auf das Leistungsgewicht ergibt dies 6.5 kW/kg und 2.5 Wh/kg. Mit den entwickelten Supercaps wurde ein Modul zusammengebaut und mit einer an der EPFL entwickelten Ladungsausgleichselektronik versehen,

die die Ladungsdifferenzen von jeweils 5 Einzelzellen untereinander ausgleicht. In diesem Modul sind zwei mal 25 Kondensatoren in Reihe geschaltet und liefern 60 V, 60 F und können bis max. 45 kW belastet werden. Als Modul werden 1.5 Wh/kg erzielt.

Die Auslegung und Optimierung einer möglichst effizienten **Leistungselektronik** erfolgte unter dem Gesichtspunkt der Effizienz aber auch mit der Restriktion des im Fahrzeug verfügbaren Bauraumes. Die vorgeschlagene Topologie wurde im Berichtsjahr an der ETHZ realisiert.

Für die **Steuerung** wurde die Hardware evaluiert und beschafft. Als Rechner wird ein dSpace System verwendet, das es gestattet, am Rechner entwickelte Regler und Steuerungsteile direkt in die Realtime-Konfiguration zu laden und zu testen. Diese durchgängige Vernetzung wird die Abstimmungszeit auf dem dynamischen Prüfstand verkürzen.

Zu Beginn des Projektes liegt das Schwergewicht nicht auf der **Fahrzeugseite**. Dieses ist jedoch evaluiert und beschafft. Sämtliche Kenndaten werden für die Auslegung der Systemkomponenten verwendet.



Abb. 6: Interesse der Autoindustrie an Schweizer Forschung: VW Konzernchef F. Piëch zusammen mit PSI Direktor M.K. Eberle, U. Eichhorn, Forschungschef VW, P. Dietrich und A. Tsukada vor der 6,5 kW PSI-Brennstoffzelle.

Im Folgejahr soll der Antrieb bereits auf dem dynamischen Prüfstand erprobt werden.

MOBILITÄTSVERHALTEN

Im Projekt **Nachhaltiger Freizeitverkehr** [4] wurden Potentiale, Möglichkeiten und Massnahmen für ein entsprechendes Mobilitätsverhalten untersucht. In Fallstudien werden Ansätze aufgezeigt, wie beispielsweise Veranstaltungsbesucher vom Auto auf den öffentlichen Verkehr gelenkt werden können. Die Bilanz zeigt, dass nicht nur Potentiale für einen nachhaltigen Freizeitverkehr vorhanden sind, sondern wirksame und effiziente Massnahmen ergriffen werden können, welche ökologische, wirtschaftliche und soziale Ziele der Nachhaltigkeit fördern. Wenn auf zentrale Bedingungen und auf den Erfolg

fördernde Faktoren geachtet wird, ist es durchaus möglich, für Massnahmen eines nachhaltigen Freizeitverkehrs die politische Akzeptanz zu schaffen. Im privaten PW-Verkehr können bis ins Jahr 2020 im Vergleich zum Trend jährlich 3 bis 5 Millionen Tonnen oder 30-50% CO₂ vermieden werden.

AKKUMULATOREN UND SUPERCAPS

Die Firma MES-DEA in Stabio / TI erhöht in einem vom BFE mitfinanzierten Forschungsvorhaben die Energiedichte der **ZEBRA** Hochtemperaturbatterie [17]. Mit verschiedenen Ansätzen, wird die spezifische Energiedichte von 94 auf über 120 Wh/kg erhöht. Parallel zu diesem Forschungsvorhaben baut die Firma MES ihren Fabrikationsstandort in Stabio mit einer zusätzlichen Produktionshalle mit einer Fläche von 20'000 m² weiter aus (vergleiche auch Jahresbericht 1996: die damals erstellte 16000 m² grosse Fabrikationshalle ist ausgelastet).

Die Fachhochschule Bern/Biel entwickelte im Rahmen ihres **VEBILA**-Projekts [19] (Verbesserung der Lebensdauer von Batterien mit einem intelligenten Ladegerät) das Ladegerät BALADUM. Dieses Gerät besteht aus einem Leistungsblock von 12 Volt und mehreren elektronischen Schaltern. Damit können der Reihe nach mehrere Batterieblöcke mit hohen Leistungen während einer Dauer von 0.5 bis 5 Minuten geladen werden. Nach einem Durchgang beginnt der Vorgang von Neuem bis die gesamte Batterie aufgeladen ist. BALADUM verlängert so die Lebensdauer von Bleibatterien und senkt gleichzeitig die Kosten für die Leistungselektronik.

Die technische und industrielle Weiterentwicklung von Hochleistungskondensatoren, sogenannten **Supercaps**, verläuft zur Zeit sehr rasch. Eine der weltweit führenden Firmen ist Montena aus Rossens, die in der Forschung eng mit dem PSI zusammenarbeitet. Der grosse Vorteil der Supercaps ist ihre Verträglichkeit für sehr grosse Leistungen und ihre praktisch unbegrenzte Zahl der Ladezyklen bei konstanter Kapazität. Ein gewichtiger Nachteil dieser Energiespeichertechnologie ist aber die Energiedichte, die auch künftig nur etwa ein Drittel der einer modernen Bleibatterie betragen wird.

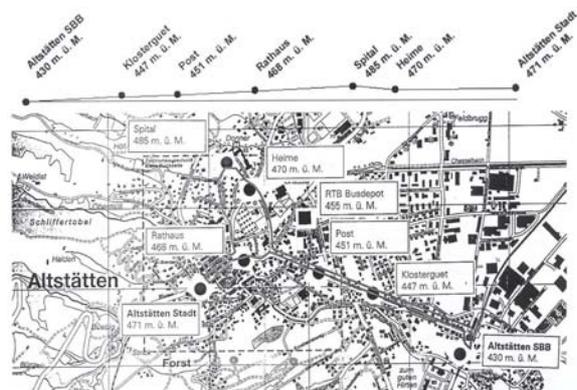


Abb. 7: Geplante Route des elektrischen Kleinbus in Altstätten mit Streckenprofil:

Die Fachhochschule Zentralschweiz in Horw entwickelt im Projekt **TOHYCO** [18] einen elektrischen Kleinbus, der die notwendige Fahrenergie induktiv auflädt und in Supercaps, zwischenspeichert. Der TOHYCO-Rider Kleinbus soll ab Sommer 2001 im Linienbetrieb der Rheintal Bus AG in Altstätten eingesetzt werden (Abb. 7).

Im Berichtsjahr wurde der Bus für die Elektrifizierung vorbereitet und ein wassergekühlter Asynchronmotor als Antriebsaggregat evaluiert und beschafft. Für den Energiespeicher, bestehend aus

2000 Supercaps, wurde die Ladungsausgleichsschaltung weiter verbessert und mit einer Temperatur- und Spannungsüberwachung ergänzt. Die Software für das Leitsystem wurde weiter ausgebaut und verfeinert. Die Wahl der Hardware –Fahrzeugkomponenten erfolgte generell so, dass sie eine Anbindung zum CAN-Bus haben. Die Firma Wampfler (BRD) entwickelte die induktive Lade-station so, dass sie eine Aufladung des Busses innerhalb dreier Minuten erlauben wird.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

ALLGEMEINES

Das 1:2-Modell des von der Firma HORLACHER entwickelten **ZebraLifts** [1] konnte an mehreren Orten zur Demonstration aufgebaut werden (Abb. 8). Der elektrisch angetriebene Lift ermöglicht das sichere Überqueren von stark frequentierten Verkehrswegen wie Strassen oder Bahnlinien und ist kostengünstiger als eine herkömmliche Über- oder Unterführung. Zudem kann der Lift von Behinderten problemlos benutzt werden. Die Verkehrsteilnehmer profitieren von einem kontinuierlichen Verkehrsfluss, was sich positiv auf den Energieverbrauch und Emissionen (inkl. Lärm) der Fahrzeuge sowie die Verkehrssicherheit auswirkt.



Abb. 8: Zebra Lift an der SUN 21 in Basel

Ein weiterer Aspekt bezüglich Sicherheit sind die Passanten, die dank dem Lift keine dunkle, unübersichtliche Unterführung passieren müssen.

LEICHTMOBILE

Im Rahmen des **Grossversuchs** mit Leicht-Elektromobilen (LEM) in **Mendrisio** [5], für den die ASSOVEL die Projektverantwortung hat, sind im Jahr 2000 131 Fahrzeuge neu in Verkehr gesetzt worden. Damit verkehrten Ende 2000 insgesamt 385 subventionierte Fahrzeuge im Versuchsgebiet. Die 19 bewilligten aber bis zum Jahreswechsel nicht eingelösten Gesuche betreffen vor allem 4-plätzig

PW und das erste Hybridfahrzeug, das in der Schweiz seit Oktober 2000 erhältlich ist.

Bereits Mitte Jahr konnte die Inverkehrsetzung des 350. LEM gemeldet werden. Damit hat der Grossversuch das operative Ziel bereits ein Jahr vor Projektende erreicht. Die Ausschöpfung der Projektkredite des Bundes führte dazu, dass im Verlauf des Monats März ein Bewilligungsstopp wirksam wurde. Die seither eingegangenen Gesuche hat das *InfoVEL* im Hinblick auf das Folgeprojekt *VEL2* entgegengenommen. Zu Jahresende lagen 293 solcher «eingefrorener» Gesuche aus allen Teilen des Kantons vor, die zu 80% von Privaten stammten und zu mehr als der Hälfte für Elektroautos gestellt wurden.

Der Bewilligungsstopp hat zu einer Schweregewichtsverschiebung bei den Aktivitäten des *InfoVEL* geführt. Probefahrten sind nur noch im Zusammenhang mit speziellen Anlässen und auf Anfrage von Veranstaltungspartnern durchgeführt worden. Dazu zählte insbesondere die nationale Tagung zu Elektrofahrzeugen, welche die SES in Zusammenarbeit mit der «Elettricità Svizzera Italiano», Energie 2000, dem *InfoVEL* und *e'mobile* in Locarno Mitte Mai durchführte und die mit einer öffentlichen Ausstellung und Probefahren fürs breite Publikum ergänzt wurde. Für die Tagung konnten namhafte Referenten aus dem In- und Ausland gewonnen werden. Rund 100 Fachpersonen und Medienvertreter besuchten die Fachtagung. Schätzungsweise 200 Personen vor allem aus dem Tessin konnten zum abschliessenden öffentlichen Teil begrüsst werden, in welchem eine Zusammenfassung der Fachtagung und ein Ausblick auf das Projekt *VEL2* gegeben wurde.

Die Herbstausstellung *ExpoVEL* wurde nicht im bisherigen Stil durchgeführt. Stattdessen fand ein Informationsnachmittag in Mendrisio statt, an welchem unter anderem die Grundzüge von *VEL2* aufgezeigt worden sind. Gleichzeitig konnte die Studie von Professor Sandro Furlan von der Hochschule Enrico Mattei in Mailand vorgestellt werden, welche das Potential der Elektrofahrzeuge zur Senkung der vom Strassenverkehr verursachten externen Kosten für die Städte Mendrisio, Lugano, Bern, Zürich und Genf geschätzt hat. Die letzten

Monate des Jahres 2000 standen ganz im Zeichen der breiten, kontrovers geführten Diskussionen um *VEL2*. Ausgelöst wurden diese durch den TCS Tessin, der Teile des Folgeprojekts in Frage stellte.



Abb. 9: Der Schweizer Gemeinschaftsstand am EVS-17 in Montreal

Während dem ganzen Jahr konnten erneut verschiedentlich Fachleute und Interessierte aus dem In- und Ausland in Mendrisio begrüsst werden. Grosse Beachtung und mehrfache Erwähnung hat der Grossversuch auch am EVS-17 in Montreal gefunden. In Referaten und Postern sind die neusten Erkenntnisse präsentiert worden. Wiederum zeichnete sich das *InfoVEL* verantwortlich für den Schweizer Gemeinschaftsstand, zu welchem erstmals mit Unterstützung des Verbandes *e'mobile* ein Katalog publiziert wurde. Am Stand konnten eine Auswahl von Schweizer Fahrzeugen und Komponenten sowie mehrere Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekte einem internationalen Fachpublikum vorgestellt werden. Den Mitausstellern hat dies erlaubt, wertvolle Kontakte zu knüpfen und Einblick in die Besonderheiten des nordamerikanischen Marktes zu gewinnen. Vereinzelt resultierte aus diesen Kontakten noch an der Ausstellung ein Auftrag. Insgesamt darf der Schweizer Stand zu den meist beachteten Ständen der Ausstellung gezählt werden. Besonders positiv aufgenommen worden sind die gezeigten Fahrzeuge, die mehrheitlich auch käuflich sind oder für welche Vertretungen in Nordamerika gesucht werden.

Im Hinblick auf eine breite Markteinführung werden durch die **Begleituntersuchungen** [6] zum Grossversuch in Mendrisio und Partnergemeinden Fragen zu drei Themenkreisen beantwortet:

- Beurteilung der Fördermassnahmen
- Energieverbrauch und Umweltwirkungen
- Veränderungen im Mobilitätsverhalten.

Die Beurteilung der Fördermassnahmen, welche letztmals 1998 durchgeführt wurde (vgl. 2. Zwischenbericht vom August 1998), wurde aktualisiert und verfeinert. Als wesentliche neue Grundlage standen rund 250 Erstinterviews zur Verfügung, welche mit neuen LEM-Besitzern unmittelbar nach Auslieferung des Fahrzeuges durchgeführt wurden.

Zu den Bereichen Verbrauchsmessungen/Umwelteinwirkungen und Mobilitätsverhalten wurden die Erhebungen weitergeführt. Es zeichnet sich ab, dass häufig ein LEM als zusätzliches Fahrzeug angeschafft wird, weil sich das individuelle Umfeld (Stellenwechsel, Anzahl Haushaltsmitglieder mit Führerschein usw.) verändert. In diesen Fällen wäre der Fahrzeugbestand im Haushalt ohnehin vergrössert worden. Die Änderungen im Mobilitätsverhalten stehen somit weniger im Zusammenhang mit dem LEM als mit den Änderungen der individuellen Rahmenbedingungen.

Der Grossversuch in Mendrisio hat grosses internationales Interesse geweckt. Zu den zwei EU-Projekten UTOPIA und E-TOUR sind im Berichtsjahr zwei weitere Projekte von der EU positiv aufgenommen worden: ELEDRIVE (Netzwerkprojekt zum Thema Brennstoffzellen) und CLEANER DRIVE (Beschleunigung der Markteinführung von Strassenfahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen). Auch die Internationale Energieagentur stützt sich in ihrem Projekt *Deployment Strategies*, auf die Erfahrungen von Mendrisio.

Eine Umfrage unter den LEM-Benutzer/-innen betreffend die reservierten Parkplätze und Ladestationen zeigt, dass mehr als die Hälfte der Besitzer/-innen von 3- und 4-rädrigen LEM häufiger als einmal pro Woche einen reservierten Parkplatz benutzen. Das Bedürfnis nach reservierten Parkplätzen (und Ladestationen) ist also bedeutend grösser als bisher aufgrund der Erhebung der Belegung angenommen.

Erstmals wurden auch die Kosten für die Fördermassnahmen eingehend untersucht. Im Vordergrund stand die Strukturierung der Aufwendungen mit der Ermittlung von Grössenordnungen am Beispiel des Geschäftsjahres 1998. Rund eine Million Franken können mehr oder weniger direkt den Fördermassnahmen zugeordnet werden. Der Hauptanteil ging dabei erwartungsgemäss zu Lasten der Fahrzeugbeiträge (56 %). Neben dieser Hauptmassnahme folgen drei weitere mit etwa gleich hohem Aufwand: Die jährliche Herbstausstellung ExpoVEL, die Vermietung von Fahrzeugen sowie die Erstellung von Ladestationen.

Zur Vermietung von Elektroautos an fünf Tessiner Bahnhöfen, welche Ende 1999 unter dem Namen *EasyMove* lanciert worden war, wurde eine erste Zwischenbilanz nach einem halben Betriebsjahr gezogen. Auch wenn die absoluten Zahlen für die Anfangsphase noch nicht aussagekräftig sind, liefert sie doch schon interessante Hinweise: Mehr als 50 % der täglichen Fahrleistungen betragen über 50 km. 1/3 der Tagesfahrleistungen lag sogar über 80 km, was eine Nachladung erfordert. Dies ist ein Zeichen für den hohen Stellenwert der öffentlichen Ladestationen. Die Möglichkeit, das Fahrzeug an einem anderen als dem Ausgangsbahnhof zurückzugeben, wurde bisher nur in 6 % der Fälle genutzt.

Von den Partnergemeinden wurden vor allem die beiden Basler Gemeinden Muttenz und Riehen sowie

Wohlen (zusammen mit dem Kanton Bern) bei der Ausarbeitung von Folgeprojekten unterstützt. Daraus ist u.a. *NewRide*, ein Programm des Kantons Bern zur Verbesserung der Rahmenbedingungen für die Markteinführung von Elektrozweirädern (ohne Fahrzeugsубventionen) entstanden.

Im Zusammenhang mit den Anschlussprogrammen an den Grossversuch im Kanton Tessin, wird unter anderem im Auftrag des Bundesamtes für Strassen (ASTRA) ein Bonus/Malus-System auf kantonaler Stufe ausgestaltet.

Die Öffentlichkeitsarbeit war geprägt durch den 3. Zwischenbericht zum Grossversuch, der im August 2000 veröffentlicht wurde. Daneben wurden die Ergebnisse der Begleituntersuchungen in einem guten Dutzend Artikel in Fachzeitschriften sowie an mehreren Tagungen und Seminaren vorgestellt.

In den **Partnergemeinden Muttenz** [7], **Riehen** [8], **Sion** [9], **Wil (SG)** [10] und **Wohlen (BE)** [11] sind sehr unterschiedliche Entwicklungen zu beobachten. Eine deutliche Belebung verzeichneten Muttenz und Riehen; ein anhaltend reges Interesse ist in Wohlen festzustellen, während in Sion nur ein Fahrzeug neu in Verkehr gesetzt wurde und in Wil keines. Die beiden Partnergemeinden in der Region Basel haben spürbar von der intensiven Öffentlichkeitsarbeit im Rahmen der Aktion «Die bessere Mobilität» des Kantons Basel-Stadt profitiert. Diese Aktion beinhaltete den Verkauf von 400 der E-Bikes (Flyer und Dolphin) zu einem um 1'800 Franken vergünstigten Preis. Wie die Käufe von 2-Rädern in Mendrisio und den Partnergemeinden werden auch die Basler und Baslerinnen im Rahmen des EU-Projektes E-TOUR (Electric two wheelers on urban roads) evaluiert.

Die grosse Medienpräsenz dieser beiden E-Bikes hat in Muttenz und Riehen zu einer Reihe von Anträgen für diese Modelle geführt. Insgesamt sind in **Muttenz** 20 Fahrzeuge in Verkehr gesetzt worden mit einer gleichzeitigen markanten Verschiebung von den 4-Radfahrzeugen zu den 2-Rädern. Ende Jahr verkehrten 54 E-Fahrzeuge im Rahmen des LEM-Projektes. 10 Gesuche für den Scoot'elec und die beiden oben erwähnten E-Bikes wurden unter anderem wegen Lieferengpässen noch nicht eingelöst. In **Riehen** sind 8 Gesuche für E-Bikes gestellt und bewilligt worden. Auch hier verzögert sich die Auslieferung. Mehrere Gesuche gingen zudem für den Scoot'elec und für Twikes ein. Total sind 8 Fahrzeuge in Verkehr gesetzt worden, womit die gesamte LEM-Zahl per Ende 2000 auf 46 stieg. Beendet worden ist das Projekt mit dem Einsatz des LEM der Gemeinde am Wochenende als Ruftaxi. Die Taxifahrer konnten sich allerdings zu wenig für das Projekt erwärmen, woraus sich verschiedentlich Probleme ergaben.

In **Wohlen** ist ein anhaltend reges Interesse zu beobachten. Im September konnte hier das 100. LEM offiziell in Verkehrgesetzt werden, womit die Subventionierung für alle Fahrzeugtypen beendet wurde. Aufgrund des Engagements eines lokalen

Händlers wurden hier ebenfalls vor allem E-Bikes und E-Scooter nachgefragt. Eine Befragung unter all jenen, die am LEM-Weekend eine Probefahrt gemacht haben, zeigt ein weiterhin beachtliches Potential in der Gemeinde insbesondere für die schnellen E-Bikes. Fast ein Fünftel der 228 Befragten gaben an, sich ernsthaft mit dem Kauf eines LEM zu befassen und die grosse Mehrheit kann sich vorstellen, einmal ein LEM zu beschaffen.

Kein einziges Gesuch ging in **Wil** ein, wo im Jahr 2000 auch kein neues LEM in Verkehr gesetzt wurde. Total verkehren hier 32 LEM. Zurückzuführen sein dürfte diese Stagnation zu einem wesentlichen Teil darauf, dass die breite Bevölkerung mit dem Abschluss des Elektro-Bus-Projektes ihr Vertrauen in die Elektrofahrzeuge generell verloren hat. Zudem fehlt ein engagierter Anbieter, weshalb sich auch die Durchführung eines LEM-Weekends mit Probefahren nicht aufdrängte. Neue Impulse für das letzte Projektjahr könnte von der Markteinführung von Hybridfahrzeugen ausgehen, wie die sporadischen Anfragen bei der LEM-Ansprechstelle vermuten lassen.

Trotz vielfältigen Aktivitäten stagniert die LEM-Zahl auch in **Sion**, wo lediglich der regionale Energieversorger ESR einen Kleintransporter in Betrieb nahm. Von den total 35 LEM sind mit 25 Fahrzeugen die Scooter nach wie vor in der klaren Mehrzahl. Das LEM-Weekend mit einem Geschicklichkeitsfahren für alle Interessierten auf der zentralen Place de la Planta vermochte im Gegensatz zu den Vorjahren keine neuen Anträge auszulösen. Ein Schwergewicht der Aktivitäten lag auf dem Ausbau der Infrastruktur: In Sion konnte am LEM-Weekend die 100. Ladestation nach dem System *Park & Charge* eingeweiht werden. Gleichzeitig sind die öffentlichen Ladestationen auf das international gängige System *Park & Charge* umgerüstet worden. Ferner sind im Parkhaus neben einer Ladestation zwei Plätze speziell für Kompaktautos reserviert. Gleichzeitig ist die Entwicklung einer induktiven Lademöglichkeit durch die Hochschule soweit fortgeschritten, dass eine Prototyp-Anlage installiert werden konnte.

Wie in Mendrisio führen die Projektteilnehmer in den LEM-Partnergemeinden ein Fahrtenbuch mit den gefahrenen Distanzen und der dazu ab Steckdose benötigten Energiemenge, die mit einem Kilowattstundenzähler gemessen wird. Bis Ende 2000 konnten so mehr als 1,2 Millionen Kilometer von 279 LEM erfasst und ausgewertet werden. Die Ergebnisse dieser **Energieverbrauchsmessung** zeigen, dass die Bandbreite der Energiewerte zwischen den einzelnen Fahrzeugen umso kleiner ist, je ausgereifter das Fahrzeug ist. Zudem sind diese in der Praxis gefahrenen Werte näher beim Laborwert, den die Messungen auf dem Rollenprüfstand ergeben haben. Ferner bestätigt sich die Beobachtung, dass der durchschnittliche Energieverbrauch dann signifikant ansteigt, wenn das Reichweitenpotential zu wenig ausgenutzt und die Batterien oft bereits nach kurzen Strecken nachgeladen werden. Die Fahrtenbücher erlauben zudem, Benutzerprofile im Bezug auf den

Ganzjahreseinsatz der Fahrzeuge herzustellen. Bei den Elektro-Bikes in den Partnergemeinden zeigt sich, dass nur rund ein Drittel ganzjährig und regelmässig im Einsatz ist mit Fahrleistungen von bis zu knapp 4'000 km im Jahr. Fast die Hälfte der E-Biker benutzen dieses Fahrzeug nur im Sommerhalbjahr und legen mehrheitlich um die 1000 km pro Jahr zurück. Auf Modekäufe zurückzuführen sein dürften jene restlichen E-Bikes, die auch in den Sommermonaten nur sporadisch benutzt werden.

Ausser in Wil haben die Verantwortlichen in allen LEM-Partnergemeinden Diskussionen über eine mögliche Weiterführung des Projektes in einer neuen Form und auf regionaler Basis geführt und zum Teil bereits konkrete Projekte erarbeitet.

Betrieben von der POSTAUTO SCHWEIZ, startete im Herbst 1998 in der Walliser Gemeinde **Martigny** das Projekt **CityCar** [12]. Dieses vom Betreiber, dem Kanton Wallis, der Standortgemeinde und dem BFE finanzierte Projekt ermöglicht mit 30 öffentlich zugänglichen Elektrofahrzeugen einen bewussten Individualverkehr in der Agglomeration. Im Februar 2000 ist die Testfahrerzahl auf das geplante Maximum ausgedehnt, die Zahl der CityCar stations auf 21 erhöht und die Einsatzzone der Fahrzeuge vergrössert worden. Mit der Einführung der Tarifierung auf den 1. Mai 2000 ist die Benutzerfrequenz markant abgesunken. Die Stadt erweist sich als zu klein, um eine genügend grosse Nachfrage für ein solches Fahrzeugangebot entstehen zu lassen, um das System wirtschaftlich zu betreiben. Zudem sind grössere technischen Schwierigkeiten mit den Fahrzeugen entstanden als zu Projektbeginn erwartet. Das System und damit die in Martigny gemachten Erfahrungen stossen dennoch sowohl bei den Stadtbehörden im In- und im Ausland als auch bei der Automobilindustrie auf ungebrochen grosses Interesse.

Der Energieverbrauch der CityCar-Fahrzeuge des Modells Ligier Ambra weist einen vergleichsweise hohen Durchschnittswert auf. Dies ist einerseits auf das Gewicht zurückzuführen, das die spezielle Bodenplatte und die vielen Zusatzaggregate für die Überwachung der Fahrzeuge einbringen. Andererseits weisen auch andere, kollektiv genutzte LEM im Grossversuch einen überdurchschnittlichen Energieverbrauch auf. In Martigny zeigt sich aber vor allem der Zusammenhang zwischen kurzen Fahrdistanzen – im Durchschnitt weniger als 4 km – mit immer darauf folgenden Ladevorgängen und dem hohen Energieverbrauch sehr deutlich.

BIOGAS-FAHRZEUGE

Das Projekt **Biogas-Fahrzeuge** in **Bachenbülach** [13] ist mit der Inverkehrsetzung des 100. Fahrzeugs offiziell und erfolgreich abgeschlossen worden. Mit 49 zu 52 Fahrzeugen halten sich Private und Gewerbebetriebe als Käufer beinahe die Waage. Vor allem die Markteinführung des Fiat Multipla, bei welchem die Gasflaschen raumsparend im Boden untergebracht sind, hat das Interesse an den bivalen-

ten Fahrzeugen spürbar verstärkt. Als besonders erfolgreich erwiesen hat sich die kostengünstige Vermietung des Gemeindefahrzeugs. Sein Vermietungsgrad erreichte 68 %. Insgesamt sind mit diesem Versuchsfahrzeug über 60'000 km zurückgelegt worden. Bei entsprechenden Rahmenbedingungen scheint nach den Erfahrungen im Zürcher Unterland auch in der gesamten Schweiz ein Markt für bivalente Fahrzeuge vorhanden zu sein. Als wichtiges Element der Rahmenbedingungen hat sich das Gastankstellennetz bestätigt, das in der Schweiz ausser im Grossraum Zürich zur Zeit noch lückenhaft ist.



Abb. 10: Kompogasfahrzeug an der Tankstelle

DIVERSES

Das BFE unterstützte weiterhin das Projekt **«Legair»** der **business@lass** [14] des Gymnasiums Köniz. Im Rahmen des Betriebswirtschaftsunterrichts sammeln die Schüler an konkreten Beispielen praktische Erfahrung im Wirtschaftsleben. Nach dem Projekt **LEM-Vermietung** startete Legair die **E-Bike-Ausleihung** in Bern. Trotz nur 2-monatiger Vorbereitungszeit war der Eröffnungsanlass mit der offiziellen Inbetriebnahme einer Solartankstelle am 18. Mai ein voller Erfolg: Zahlreiche Medienberichte auf regionaler und nationaler Ebene verhalfen den bei «Bern rollt» gratis ausgeliehenen E-Bikes des Typs Flyer zu grosser Aufmerksamkeit. In den ersten Ausleih-Monaten war der Andrang so gross, dass Kunden auf eine Warteliste gesetzt werden musste. Den Kunden wurde nur eine Akku-Ladung oder etwa 30 km Fahrt zugestanden, worüber sich manche enttäuscht zeigten. Nach Aussage des Betriebsleiters von «Bern rollt» zählten auch Stammgäste zur Kundschaft, die mit dem E-Bike zur Arbeit fuhren. Das Angebot erwies sich zudem als touristische Attraktion, wobei sich die ausländische Kundschaft allerdings oft überrascht darüber zeigte, dass ein internationaler Führerausweis erforderlich ist. Insgesamt wurden die beiden E-Bikes bis zu 23-mal pro Woche ausgeliehen und konnten im Herbst versteigert werden. Zum Jahresabschluss konnte «Legair» den ersten Preis in der Kategorie Einzelpersonen und Schulklassen des Prix eta+ für einen innovativen Umgang mit Energie entgegen nehmen.

Abgeschlossen ist das Projekt **MAX-Car** der **Arbeitsgemeinschaft Baumann Partners GmbH/Mobility CarSharing Schweiz** [15] in Luzern, das energieeffiziente Fahrzeuge im

CarSharing-Einsatz zum Inhalt hatte. Das Pilot- und Demonstrationsprojekt ist in das nationale Projekt Mobilstationen übergeführt worden und dient als Basis für eine lokale MobilStation am Bahnhof Luzern. Aus dem MAX-Car-Projekt sind Parkplätze für Kleinfahrzeuge im Bahnhofparking realisiert worden. Weiter wurden eine während 20 Stunden am Tag bewachte Velostation (ebenfalls am Bahnhof), die Installation einer Erdgasbetankungsstelle bei den städtischen Werken Luzern sowie erste Tests mit dem E-Bike Flyer als Sharing-Fahrzeug am Sitz des Mobility Call-Centers Luzern realisiert.

Unter der Führung des Verbandes *e'mobile* [16] sind zahlreiche Aktivitäten zur generellen Promotion von Elektro- und Hybridfahrzeugen als energieeffiziente Verkehrsmittel durchgeführt worden. Ein breites Publikum konnte an der Ausstellung MobiBâle in Basel angesprochen werden. Diese zählte über 35'000 Besucher. Der Verband zeigte die aktuell erhältlichen Elektrofahrzeuge aller Kategorien und bot auf einem kurzen Parcours in der Halle die Möglichkeit zu einer Schnupperfahrt. An 30 Anlässen sind in der ganzen Schweiz Probefahrten im Freien angeboten worden. Rund zwei Drittel der Personen gaben nach der Probefahrt an, sie könnten sich die Benutzung des getesteten Fahrzeugs vorstellen. Durchwegs positiv aufgenommen worden ist das erste Hybrid-Fahrzeug auf dem Markt. Neben diesen kurzen Probefahrten sind die Fahrzeuge Interessierten für eine Langzeiterprobung während mehreren Tagen zur Verfügung gestellt worden. Dies ermöglicht es, die Einsatzmöglichkeit der auf dem Markt erhältlichen Fahrzeuge

selber zu testen. Instruktionen zum möglichst energieeffizienten Fahren gewinnen mit der Langzeiterprobung an Bedeutung. Dies verbessert sowohl das Verständnis zu als auch den Umgang mit den Fahrzeugen.

Die meisten Anfragen bei den Infozentren des Verbandes bezogen sich auf das aktuelle Angebot von Neufahrzeugen. Der steigende Benzinpreis hat sich in der zweiten Jahreshälfte in einer Zunahme von Anfragen bemerkbar gemacht. Vermehrt nachgefragt wurden auch Occasionsfahrzeuge, was auf den unverändert hohen Kaufpreis für Neufahrzeuge zurückzuführen sein dürfte. Zusätzlich ist der Verband mehrfach um Informationsmaterial für Vorträge oder Arbeiten an Schulen und Hochschulen angefragt und um die Vermittlung von Kontakten zu Fachleuten gebeten worden. Die Kontaktaufnahme erfolgt zunehmend nach einem Besuch auf der Homepage des Verbandes. Das Informationsangebot auf der deutschen und der französischen Homepage ist im Jahr 2000 wesentlich ausgebaut worden, so dass nun neben aktuellen Meldungen auch allgemeine Informationen zu Elektro- und Hybridfahrzeugen sowie zu Projekten, die eine kombinierte Mobilität ermöglichen, vorhanden sind. Einzelne Texte sind auch in Englisch verfügbar. Im Verlaufe des Jahres konnte eine deutliche Entwicklung der Benutzerfrequenzen beobachtet werden, die im Oktober ihr Maximum erreichte. Markt- und allgemeine Informationen waren auch hier am meisten gefragt.

Nationale und internationale Zusammenarbeit



Abb. 11: Projekt E-Tour: Elektroroller in Stockholm

Auf nationaler und internationaler Ebene wurde die Zusammenarbeit und der Informationsaustausch erfolgreich fortgesetzt. Der Grossversuch hat grosses internationale Interesse geweckt. Zu den zwei EU-

Projekten UTOPIA und E-TOUR (Abb. 11) sind im Berichtsjahr zwei weitere von der EU positiv aufgenommen worden: ELEDRIIVE (Netzwerkprojekt zum Thema Brennstoffzellen) und CLEANER DRIVE (Beschleunigung der Markteinführung von Strassenfahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen). Auch die Internationale Energieagentur stützt sich in ihrem Projekt *Deployment Strategies* auf die Erfahrungen von Mendrisio.

Auch auf nationaler Ebene formieren sich, neben dem bereits beschriebenen Projekt VELdue im Kanton Tessin, Folgeprojekte der Kantone der jeweiligen Partnergemeinden: Im Kanton Bern zielt das inzwischen bewilligte Projekt „NewRide“ auf die Förderung von E-Bikes. In den Kantonen Basel Land und Basel Stadt sollen die künftigen Projekte in Richtung einer Mobilitätsberatung angelegt werden.

Bewertung 2000 und Ausblick 2001

In den Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprogrammen und -projekten konnten die im Jahr 2000 gemäss Projektplan angestrebten Ziele weitgehend erreicht werden. Einige Projekte gaben der Schweizer Zulieferindustrie wesentliche Impulse. Andere werden mehr oder weniger direkt im nahen Ausland umgesetzt. Der Grossversuch mit Leichtmobilen in Mendrisio und im Kanton Tessin übertraf sogar kühne Prognosen, so dass aus budgetären Gründen ein Stop der Promotion dieser energieeffizienten Fahr-

zeugen in Kraft gesetzt werden musste.

Im Berichtsjahr konnten trotz knappster Ressourcen einige Projekte und Folgevorhaben gestartet resp. initiiert werden. Der markante Preisanstieg bei den fossilen Energien im Sommer 2000 und die im Vorfeld der Erschöpfung der Erdölvorkommen in der Nordsee (Zeitraum 2010) zu erwartenden Preisschübe für fossile Energien, erhöhen die Chancen für eine erfolgreiche Umsetzung der bisherigen und künftigen Resultate beträchtlich.

Liste der Projekte und Internet-Adressen

(JB) Jahresbericht 2000 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

- [1] M. Horlacher, HORLACHER Möhlin: *Modultec I und II – Modultechnologie für Leichtmobile* (JB, ENET 9454961), *ZebraLift*, <http://www.horlacher.com/>
- [2] L. Guzzella, ETH-Zürich: *PALOS I und II: Optimale Antriebssysteme für Leichtfahrzeuge* (JB) / ENET 9555285, <http://www.ethz.ch/>
- [3] P. Dietrich, PSI Villigen: *BRESA – familientauglicher PW mit Brennstoffzelle* (JB), <http://www.psi.ch/>
- [4] R. Meier, Bern: *Nachhaltiger Freizeitverkehr* (SB)
- [5] M. Piffaretti, ASSOVEL, Mendrisio: *Grossversuch mit Leicht-Elektromobilen in Mendrisio* (JB) <http://www.infovel.ch>
- [6] U. SCHWEGLER, Fischingen, ARGE ABAY & MEIER / POLYQUEST, Zürich / Bern: *Grossversuch mit Leicht-Elektromobilen in Mendrisio und Partnergemeinden* (JB)
- [7] P. Enzmann, Gemeinde MuttENZ: *LEM Partnergemeinde MuttENZ* (JB)
- [8] R. Grass, Gemeinde Riehen: *LEM Partnergemeinde Riehen* (JB)
- [9] M. Maurer, Municipalité, Sion: *Intégration de VEL en ville de Sion* (JB)
- [10] S. Derron: Gemeinde Wil: *LEM-Partnergemeinde Wil* (JB)
- [11] H. Leu, MOBILEM, Wohlen: *MobiLEM-Wohlen* (JB)
- [12] J.-M. Germanier, LA POSTE, Sion: *CityCar Martigny* (JB)
- [13] F. Stuker, Bachenbülach: *Versuch mit Biogasfahrzeugen in Bachenbülach und Umgebung* (SB)
- [14] P. Sägesser, BUSINESS©LASS, Köniz: *Legair, Elektromobile in der Schulung* (SB) <http://www.businessclass.ch>
- [15] R. Baumann, Baumann & Partner, Luzern: *MAXCar* (SB)
- [16] W. Blum und S. Wegmann, Zürich, e'mobile: *LEM er-fahren* (SB) <http://www.e-mobile.ch>
- [17] C. Dustmann: MES-DEA, Stabio: *Zebra Batterie*, (JB): <http://www.cebi.com>
- [18] V. Härrli, HTA Luzern: *Tohyco* (JB): <http://www.hta.fhz.ch>, <http://www.supercapacitor.org>
- [19] K. Meier-Engel HTA Biel *Paladum* (JB), <http://www.hta-bi.bfh.ch>

ELEKTRIZITÄT

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 2000

Roland Brüniger

roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch



Druckluftsystem eines Industriebetriebs

In der Schweiz verbrauchen etwa 150'000 Druckluftanlagen im Jahr rund 750 GWh Elektrizität. Mit einer konsequenten Umsetzung des nun bestehenden Wissen könnten insgesamt über 100 GWh eingespart werden.

Programm-Schwerpunkte und anvisierte Ziele 2000

In allen Bereichen des täglichen Lebens spielt die Elektrizität eine unverzichtbare Rolle. Das BFE-Programm **Elektrizität** unterstützt in spezifischen Bereichen einen optimierten Einsatz der elektrischen Energie von der Erzeugung über die Verteilung bis zur rationellen Verwendung, wobei eine klare Konzentration in der Förderung einer *effizienten und rationellen Elektrizitätsnutzung* liegt.

Nachdem die **vier Schwerpunkte** *Energie- und Informationstechnik, elektrische Antriebe und Motoren, elektrische Verteilung* sowie *Hochtemperatur-Supraleitung* in den vergangenen zwei Jahren mit den etablierten Trendwatching-/Begleitgruppen definiert und bereinigt wurden, galt es als **oberste Zielsetzung im Jahr 2000**, darauf aufbauend das Gesamtkonzept *Elektrizität* für die Jahre 2000 – 2003 kohärent zusammenzufassen.

Im Schwerpunkt **elektrische Verteilung** wurde auf der Basis des entsprechenden Teilkonzepts mit der Umsetzung konkreter Projekte begonnen. Aufgrund der fortschreitenden Marktliberalisierung ist die Initiierung entsprechend tragfähiger Projekte jedoch aufwendig und zeitintensiv. Zudem wurde eine starke Einbindung von kompetenten Fachhochschulen vorangetrieben.

Im Gebiet **Hochtemperatur-Supraleitung in der Energietechnik** wurde aufgrund der knappen finanziellen Möglichkeiten die Verlagerung auf Studienarbeiten sowie Informationsvermittlung vorangetrieben.

Das im letzten Jahr geschaffene Kompetenzzentrum mit Schwerpunkt **Energie- und Informationstechnik** konnte weiter etabliert werden und insbesondere auch über internationale Kontakte die Anliegen der Energieeffizienz verbreiten und unterstützen. Ein wichtiger Aspekt war dabei die Untersuchung des Energieverbrauchszuwachs im Haushalt durch die zunehmende Vernetzung.

Unverändert stand im Bereich **Antriebe/Motoren** neben den Bemühungen um eine höhere Effizienz die Koordination und Zusammenarbeit mit der EU im Bereich des Auslege-Tools OPAL sowie die Promotion von energieeffizienten Antrieben im Vordergrund.

Wegen der Reorganisation des Bundesamts für Energie sowie der einhergehenden personellen Veränderung war die Sicherstellung des BFE internen Fachwissens gleichermassen eine Zielsetzung fürs Jahr 2000.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

ELEKTRISCHE VERTEILUNG

Die Marktliberalisierung schreitet in der Schweiz zügig voran und sowohl die Politik als auch die betroffenen Institutionen und Unternehmen konzentrieren ihre Aktivitäten stark auf dieses markante Ereignis. Kürzlich veröffentlichte Berichte aus den USA und insbesondere aus Kalifornien zeigen zwar, dass mit der Liberalisierung auch Gefahren verbunden sind und dass aufgrund des verstärkt kurzfristigen Denkens bereits kritische Versorgungsengpässe zu Spitzenzeiten aufgetreten sind. Zwar ist dies in der Schweiz nicht der Fall, aber diverse Gespräche mit der einschlägigen Elektrizitätsindustrie zeigen naturgemäss ähnliche, auf Kurzfristigkeit ausgerichtete Tendenzen. Einhergehend mit der generellen Verkürzung des Planungshorizonts nimmt deshalb auch das Interesse an langfristig orientierten Forschungsprojekten ab.

Dieser Trend drückt sich unter anderem auch dadurch aus, dass der Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL) zur Zeit im Umbruch steht und sich neu orientieren muss [17]. Es bleibt zu hoffen, dass diese wichtige Institution der Elektrizitätswirtschaft trotz Liberalisierung und Kostendruck erhalten wird.

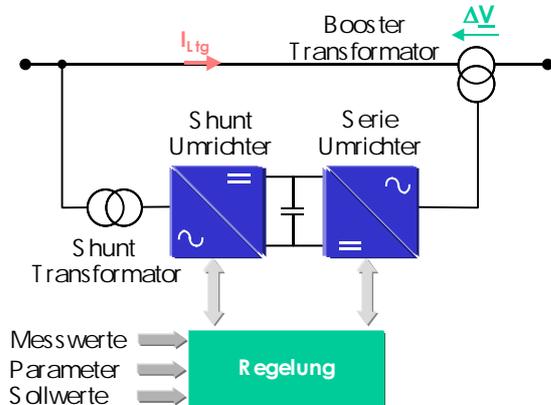
In einem liberalisierten Markt sind nicht-diskrimi-

nierende grenzüberschreitende Übertragungs-Preise die Grundlage für die Entwicklung eines funktionierenden europäischen Elektrizitätsmarktes. Mit der gemeinsam vom BFE und der *European Commission for Electricity and Gas Regulation* (CREG) finanzierten **Studie über die Methoden der Tarifierung grenzüberschreitender Elektrizitätsübertragung** [1] sollen diese Methoden untersucht werden.

Die Zielsetzung des Projekts **Entwicklung von system-orientierten FACTS-Elementen** (*Flexible AC Transmission System*) [2] lag in der Systementwicklung von FACTS-Elementen mit optimaler Wirtschaftlichkeit. Als Beispiel für die zu entwickelnden FACTS-Elemente standen einerseits der Universale Lastflussregler (UPFC), der eine unabhängige Regelung der Wirk- und Blindleistungsflüsse sowie der Spannungsregelung erlaubt (siehe Abbildung), und andererseits die „*Advanced Series Compensation*“ (ASC), deren Integration ins Netz transformatorlos erfolgen kann und welche die technologische Basis für die Realisierung von Betriebsmitteln mit UPFC-Eigenschaften darstellt.

Beginnend beim Hardwareaufbau der eingesetzten Leistungselektronik bis hin zur Integration der Regelung des Gesamtsystems in die Netzbetriebsführung wurden (1.) wirtschaftliche FACTS-Elemente durch

Minimierung der primärtechnischen Einrichtungen untersucht, (2.) die optimalen FACTS-Element-Funktionen und die optimale FACTS-Element-Anordnung im Netz abhängig von typischen Netzkonfigurationen festgelegt und (3.) Verfahren zur Optimierung des Netzverhaltens erarbeitet.



FACTS-Element „Unified Power Flow Controller“

Die Arbeiten des im Rahmen des europäischen JOULE-Programms durchgeführten Projektes **FlyWiP** (*Flywheel Energy Storage for Wind Power Generation*) [3] sind unterschiedlich schnell vorangekommen. Die meisten Komponenten des Schwungradspeichers (siehe Abbildung) mit einem Energieinhalt von 15 kWh, einer max. Leistung von 1 MW und einer Drehzahl von 15'000 U/min sind weitgehend entwickelt, wogegen einzelne Bereiche stark zurückgeblieben sind.



Schwungradspeicher bei Windgeneratoren

Obwohl der Schweizer Teilnehmer neben den eigenen Arbeits-Verpflichtungen im Konsortium zusätzliche Aufgaben übernahm, wurde das Projekt in Rücksprache mit der EU-Kommission vorzeitig beendet. Die diesbezüglichen Arbeiten werden aber voraussichtlich ausserhalb des EU-Projektrahmens weitergeführt.

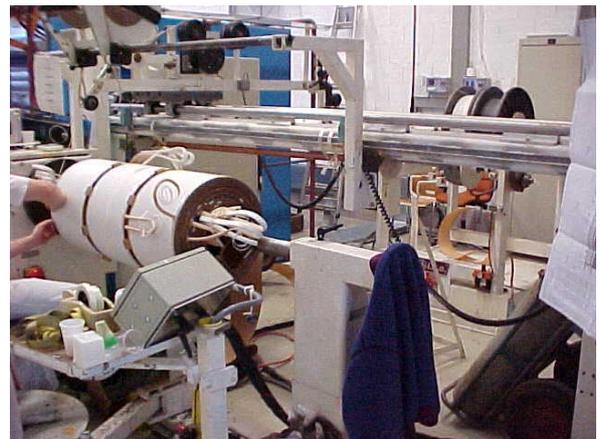
Sowohl an der ETHZ als auch an der EPFL erfolgen zu verschiedenen Themenkreisen der Übertragungs- und Verteilnetztechnologie Forschungsaktivitäten [20, 21].

Im nachfolgenden Abschnitt *Hochtemperatursupraleitung* werden Komponenten beschrieben, die ebenfalls einen Bezug zur *elektrischen Verteilung* haben.

HOCHTEMPERATURSUPRALEITUNG (HTSL)

Auf der Basis der Systemstudie **Hochtemperatur-Supraleitung im Netz** [4] konnte die zukünftige Forschungsstossrichtung verbindlich definiert werden. Aufgrund der beschränkten finanziellen Möglichkeiten konzentriert sich diese vermehrt auf die Informationsaufbereitung und -vermittlung sowie auf Studienprojekte.

Die Ziele des 1998 gestarteten Projektes **10 MVA-Hochtemperatur-Supraleiter-Transformator** [5] bestanden im Studium, der Auslegung und dem Bau eines Transformators mit Hochtemperatur-Supraleiter-Wicklungen (siehe Abbildung) und integrierter Kurzschlussstrombegrenzung. Der Transformator sollte eine Leistung von 10 MVA, eine Primärspannung von 63 kV und die Fähigkeit zur Spannungsregelung unter Last haben. Um die Kurzschlussstrombegrenzung zu erreichen, wurde ein neuer Hochtemperatur-Supraleiter mit speziellen Eigenschaften benötigt.



Wicklungseinrichtung für die HTSL-Prototypen-Spule

Hierzu wurde parallel ein separates Projekt zur Leiterentwicklung durchgeführt. Leider hat sich bei diesem Parallelprojekt gezeigt, dass die erforderliche Leiterqualität bei weitem nicht erreicht werden konnte. Das Hauptproblem lag dabei in verfahrenstechnischen Problemen beim Herstellungsprozess. Da auch in naher Zukunft keine akzeptable Lösung erkennbar war, ein entsprechender Leiter aber für das HTSL-Trafo-Projekt unerlässlich war, wurde das Projekt vorerst gestoppt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden aber für zukünftige Aktivitäten wertvolle Dienste leisten.

Die Ergebnisse des bereits 1999 abgeschlossenen Projektes *Hochtemperatur-Supraleiterkabel für die Energietechnik* konnten mangels Interesse der Indu-

strie nicht in einem Folgeprojekt weiter vorangetrieben werden.

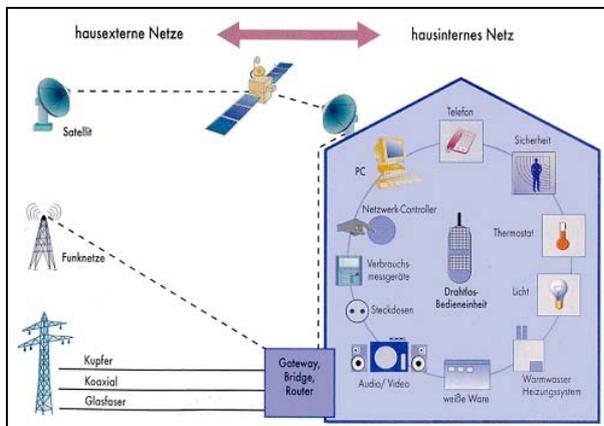
Das seit 10 Jahren laufende *IEA-Programm Assessing the Impacts of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector* [6] wurde um weitere drei Jahre verlängert. Die Schweiz bleibt weiterhin aktives Mitglied. Im laufenden Jahr wurde ein Bericht über den Status und die Fortschritte auf dem Gebiet der AC-Verluste verfasst. Ebenfalls steht ein Bericht über die Schwungradspeicherung mit Supraleiter-Lagern kurz vor dem Abschluss. Schliesslich laufen vorbereitende Arbeiten für ein Demonstrationsprojekt eines HTSL-Energiespeichers.

VERWENDUNG / RATIONELLE NUTZUNG

a) Energie- und Informationstechnik

Technologische Fortschritte in allen Bereichen der Informations- und Kommunikationstechnik, fallende Preise trotz erweiterter Funktionalitäten in neusten Gerätegenerationen und der generelle Trend der Digitalisierung bewirken, dass elektronische Geräte den Markt immer stärker durchdringen. Dies betrifft längst nicht mehr nur die professionellen Anwender in Industrie, Dienstleistungsbetrieben und Gewerbe. Auch der private Bereich nutzt verstärkt die technischen Möglichkeiten der modernen Informations- und Kommunikationstechnik.

Zudem wird mit der steigenden privaten Nutzung des Internets die seit mehreren Jahren prognostizierte Vernetzung der Geräte und Anlagen im Haushalt immer wahrscheinlicher (siehe Abbildung für Beispiel). Das Zusammenwachsen der verschiedenen Medien ist dabei sowohl Katalysator als auch erstes sichtbares Zeichen dieser Entwicklung. Die Entwicklung von einfach zu handhabenden Mensch-Maschinen-Interfaces, das Anbieten neuer Dienstleistungen und nicht zuletzt die Möglichkeit, immer und von überall in den Haushalt „hineinzuschauen“ und einzugreifen, wird auch die Vernetzung von Haushaltgrossgeräten und die intelligente Steuerung der Haustechnik fördern.



Haus mit externen und internen Netzen (Quelle: Fraunhofer Gesellschaft – Projekt in Haus-NRW)

Um die diesbezüglichen Auswirkungen auf den Energieverbrauch abzuschätzen, wurde das Projekt **Vernetzung im Haushalt** [7] durchgeführt. Für den Stromverbrauch im Haushaltssektor wird für die kommenden 20 Jahre ein maximales vernetzungsinduziertes Wachstum von 1.3% pro Jahr berechnet. Auch wenn dieses Wachstum nur halb so gross ausfallen wird, dürfte die Vernetzung in den Industrieländern die wichtigste Komponente für den wachsenden Stromverbrauch im Haushalt darstellen.

Die Arbeiten des **Kompetenzzentrums Energie- und Informationstechnik** [7] konzentrieren sich auf das Sammeln, Aufbereiten und Verbreiten von einschlägigen nationalen und internationalen Informationen über dieses Thema. Daneben werden umsetzungsorientierte Forschungsthemen evaluiert, Forschungsprojekte begleitet und teilweise selber durchgeführt.

Nachdem das Projekt **Untersuchung des Verhaltens von EndbenutzerInnen bezüglich Ein- und Ausschalten von PC's** [8] aus personellen Gründen sistiert werden musste, konnte es Mitte 2000 in einem typischen Klein- und Mittel-Unternehmen (KMU) mit etwa 50 PC-Benutzern durchgeführt werden. Dabei wurde festgestellt, dass im untersuchten Betrieb bereits heute die meisten Benutzer den PC abends und über das Wochenende abschalten. Bezüglich einer Abschaltautomatik (*Wake-on-LAN*) waren viele Benutzer skeptisch bis ablehnend und generell war ein Informationsdefizit bez. des Stromverbrauchs des PCs festzustellen. Zwar ist diese Erkenntnis nicht repräsentativ, aber die Ergebnisse der Umfrage können in anderen Umsetzungsprojekten miteinbezogen werden.

Um eine repräsentative Aussage über die Notwendigkeit des Betriebs von Netzwerk-Servern über Nacht und an Wochenenden/Feiertagen bei KMU zu gewinnen, wurde im Projekt **Servernutzung in Klein- und Mittelbetrieben** [9] eine telefonische Befragung bei 400 Betrieben in der Deutschschweiz durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass bereits rund 80% der KMU in der Deutschschweiz ein EDV-Netzwerk besitzen. Die Mehrheit jener Unternehmen, die ein Netzwerk besitzen, lassen ihre Server in der Nacht (94%) und an den Wochenenden/Feiertagen (90%) eingeschaltet, obwohl in der Nacht rund ein Viertel und an den Wochenenden sogar beinahe die Hälfte aller eingeschalteten Geräte keine produktive Leistung erbringen. Ungefähr 2/3 der Server, die in der Nacht Funktionen erfüllen und Prozesse ausführen, benötigen dafür weniger als drei Stunden. Als Hauptergebnis der Umfrage wurde ermittelt, dass ein automatisches Aus- und Einschalt-System von über 50% der Befragten befürwortet wird. Daraus kann geschlossen werden, dass ein grosser Handlungsspielraum für die Einführung automatischer Ein- und Ausschaltssysteme von Netzwerk-Servern besteht. Ob jedoch dieser Handlungsspielraum genutzt werden kann, ist – neben der Bereitstellung technisch ausgereifter Lösungen – von der Frage abhängig, wie gut es

gelingt, die Verantwortlichen von der technischen Machbarkeit, der ökologischen Wünschbarkeit und vom ökonomischen Nutzen zu überzeugen.

b) Kraft / elektrische Motoren

Die vom BFE veröffentlichte Schweizerische Elektrizitätsstatistik gibt zwar keine explizite Auskunft über den Verbrauchsanteil von elektr. Antrieben. Frühere Statistiken haben den diesbezüglichen Anteil auf etwa 40% beziffert. Kürzlich erfolgte Erhebungen und Schätzungen in Deutschland und den USA deuten jedoch darauf hin, dass dieser Wert eher zu tief angesetzt ist. In Deutschland wird der Anteil von elektr. Antrieben am Gesamtverbrauch auf ~50% und in den USA sogar auf ~60% geschätzt, was speziell in den Staaten u.a. auf den hohen Anteil an Klimageräten zurückzuführen ist. Geht man von ähnlichen Verhältnissen in der Schweiz wie in Deutschland aus, kann daraus geschlossen werden, dass auch in der Schweiz der Anteil in der Grössenordnung von ~45-50% liegt. Dieser grosse Verbrauchsanteil lässt nach wie vor ein substantielles Einsparpotential vermuten.

Verschiedene Studien untermauern dies, wobei insbesondere die vom deutschen Bundesministerium beauftragte Studie *Massnahmen zur Förderung der rationalen Energienutzung bei elektrischen Antrieben* diesbezüglich eine gute Übersicht vermittelt [14].



OPAL: Auslege-Tool für energieeffiziente Motoren

Die 1999 leider erfolglos geführten Verhandlungen mit der EU-Kommission zur gemeinsamen Vermarktung des erweiterten *Motoren-Auslegetools* OPAL wurden im Jahr 2000 wieder aufgenommen. Dank intensiven Verhandlungen konnte eine weitgehende Einigung erreicht werden. Die erzielte, vertragliche Vereinbarung ist zur Zeit in Prüfung. Es ist zu hoffen, dass die Kommission nächstens dem Verhandlungsergebnis zustimmt, womit eine europäische Vermarktung des Auslegetools ermöglicht würde.

Um der Energieeffizienz in der Antriebstechnik verstärkt Aufmerksamkeit zu verleihen und zur Schaffung einer hohen Transparenz, könnten die relevanten Werte in einer mächtigen öffentlichen Antriebsdatenbank aufgeführt werden. Mit dem Projekt **Marktuntersuchungen für ein Prüfinstitut Antriebssysteme** [10] (siehe Abbildung) wurde abgeklärt, inwiefern die relevanten Marktteilnehmer diesbezüglich ein Interes-

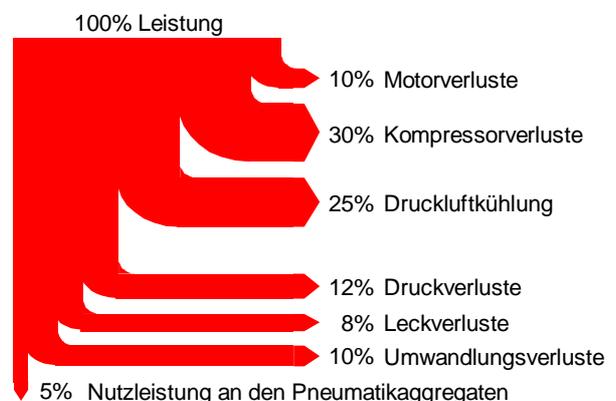
se bekunden und ob ein derartiges Institut tragfähig im Markt verankert werden könnte.



Prüfstand eines schweizerischen Motorenherstellers

Die Auswertung einer Umfrage bei 170 Marktteilnehmern kann ernüchternd kurz gefasst werden: Weder Anbieter noch Anwender sind an einer Datenbank oder einem Prüfinstitut für Antriebssysteme ernsthaft interessiert. Zur Zeit werden deshalb weitere Ideen entwickelt, um mit einer besseren Markttransparenz die Energieeffizienz der Antriebstechnik zu fördern.

In der Studie **Energieeinsparungen bei Druckluftanlagen in der Schweiz** [10] wurde festgestellt, dass ca. 150'000 Druckluftanlagen rund 750 GWh Elektrizität pro Jahr verbrauchen, was etwa 1,5% des nationalen Stromverbrauchs entspricht. In Industrie- und Gewerbebetrieben beanspruchen Druckluftanlagen bis zu 25% des betrieblichen Stromverbrauchs. Pneumatische Prozesse haben oft einen schlechten Gesamtwirkungsgrad (siehe Abbildung). Wirtschaftliche Energieeinsparungen zwischen 5% und 50% liessen sich ermöglichen. Mit energieeffizienten Druckluftanlagen könnten theoretisch 300 GWh und praktisch etwa 100 GWh Strom pro Jahr eingespart werden. Die in der Studie vorgeschlagenen Massnahmen sind vor allem für die etwa 10'000 grösseren Druckluftanlagen (ab 15 kW Kompressorleistung) wirtschaftlich interessant.



Energiefluss einer Druckluftanlage

Druckluftanlagen sind komplex und erfordern Fach- und Marktwissen. Dafür wäre eine Fachhochschule als unabhängiges Kompetenzzentrum für Druckluft eine geeignete Instanz. Es wird deshalb angestrebt, ein entsprechendes Kompetenzzentrum zu etablieren.

Die European Commission (DG Transport and Energy) beabsichtigt die Durchführung eines *Motor Driven Systems Challenge (MDSC) Programmes*, um in der Industrie vorhandene Erkenntnisse über Energieeffizienzsteigerung von Motoren/elektrischen Antrieben in grossem Massstab umzusetzen. Dank den bestehenden internationalen Kontakten konnte sich die Schweiz an den Vorbereitungsarbeiten beteiligen und wird beim Programm-Start 2001 teilnehmen. Mit dieser Teilnahme ist es für die Schweiz möglich, in Kooperation mit einer grossen Anzahl Länder (vorgesehene Teilnehmerländer sind u.a.: Frankreich, UK, Niederlande, Italien, Norwegen, Schweden, Deutschland, Griechenland, Irland) die auch für die Schweiz

wichtige Umsetzung verfügbarer Erkenntnisse mit geballter Kraft anzugehen. Die Schwerpunkte in diesem MDSC-Programm liegen dabei auf den drei Systemen Kompressoren, Pumpen und Ventilatoren.

c) *Diverses*

Das europäische Kooperationsprogramm *COST 244bis: Biomedizinische Effekte elektromagnetischer Felder* wird nächstens abgeschlossen. Eine Weiterführung ist aber geplant. Entsprechende Informationen sind auf dem Internet [18] abrufbar.

Im Projekt *Nemesis* [16] wurden wissenschaftliche Untersuchungen über das Phänomen der Elektrosensibilität in der Schweiz angestellt.

Per 1. Februar 2000 trat schliesslich die NIS-Verordnung des Bundesrats zum Schutz von „Elektro-smog“ in Kraft.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Mit den periodischen Treffen der pro Schwerpunkt etablierten *Trendwatching-/Begleitgruppen* ist die Koordination und Zusammenarbeit zwischen Industrie, Hochschule und dem BFE gewährleistet. Um diese noch zu verstärken ist vorgesehen, den Teilnehmerkreis zu vergrössern. Erste Reaktionen von neuen Interessenten sind ermutigend ausgefallen.

Eine kleine Analyse der durchgeführten Projekte in den vergangenen Jahren hat gezeigt, dass pro investierter BFE-Franken etwa 4 Franken durch Dritte (hauptsächlich Industrie) beigesteuert werden. Dieses Verhältnis zeigt deutlich das grosse Engagement der Industrie auf sowie auch die Tatsache, dass das BFE lediglich subsidiär finanzielle Unterstützung gewährt.

Ebenfalls werden periodisch Kontakte zu *anderen schweizerischen Geldgebern im Bereich Elektrizität* gepflegt. Dies betrifft vor allem den *Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL)* und die *Commission recherche, développement, prospective de la Chambre romande d'énergie électrique (RDP-CREE)*.

Der internationale Informationsaustausch auf dem Gebiet *Hochtemperatur-Supraleitung* wird vor allem

mit der Teilnahme am entsprechenden *IEA-Programm* erhalten.

Im Bereich *Energie- und Informationssysteme* werden mit grossen Anstrengungen die Kontakte zum internationalen Umfeld gepflegt. So hat der Programmleiter u.a. an der dreitägigen, EU-Konferenz über Energieeffizienz bei Haushaltsgeräten und Licht teilgenommen und wertvolle Kontakte geknüpft sowie Informationen ausgetauscht [15]. Das Kompetenzzentrum *Energie- und Informationstechnik* trägt ebenfalls zur Kontakt- und Informationspflege bei. Erwähnenswert ist schliesslich die Mitgliedschaft der Schweiz in der internationalen *Group for Efficient Appliances (GEA)*, welche auf dem Gebiet der Heimelektronik und der Bürogeräte die effiziente Stromnutzung fördert.

Im Bereich der *elektrischen Antriebe/Motoren* zeigen die Erfolge bei der OPAL-Verhandlung die international gut abgestimmten Anstrengungen auf. Zudem ist es erfreulich, dass die Schweiz im internationalen Motor Challenge-Programm eine aktiv Rolle einnehmen kann.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

ÜBERTRAGUNG / VERTEILUNG HOCHTEMPERATURSUPRALEITUNG

Die Forschungsergebnisse mehrerer BFE-Projekte wurden nach deren Abschluss durch Fachartikel und Fachvorträge einem breiten Publikum präsentiert. Insbesondere die Ergebnisse des FACTS-Projekts wurden neben der Publikation in Fachzeitschriften

anlässlich eines separaten Seminars der Elektrizitätswirtschaft nähergebracht.

Die im Rahmen des *IEA-Implementing Agreements* „Hochtemperatur-Supraleitung“ publizierten Berichte wurden den interessierten Fachleuten zugestellt.

VERWENDUNG / RATIONELLE NUTZUNG

a) Energie- und Informationstechnik

Mit der neu gegründeten Energieagentur „eae“, die aus verschiedenen einschlägigen Verbänden der Haushaltgeräte-, Unterhaltungselektronik-, Informatik- und Beleuchtungsbranche besteht, sind Kontakte hergestellt worden. Diese sind von grosser Bedeutung, da die Energieagentur ein wichtiges Element der Umsetzungsaktivitäten in diesem Bereich darstellt.

Eine Grossbank hat auf der Basis des Betriebssystems NT 4.0 eine Software für ein optimales Energiemanagement entwickelt. Die Programmleitung ist mit Bankvertretern in Kontakt um abzuklären, ob diese Software auch Dritten zugänglich gemacht werden könnte.

Um eine zusammenfassende Darstellung von verschiedenen Projekten zu bekommen, werden im Schlussbericht **Schalten von Servern** [11] auch die Erkenntnisse der Projekte *AC-Manager: P+D-Projekt in der Bundesverwaltung* und *Servernutzung in Klein- und Mittelbetrieben* miteinbezogen.



AC-Manager zum Schalten von Servern (BFE-Pilotsystem)

Mit diesen Projekten konnte gezeigt werden, dass das Abschalten von Servern (siehe Abbildung) nachts und an Wochenenden sowohl in einem Bundesbetrieb als auch in einem Kleinbetrieb möglich ist, und dass dadurch substantielle Energieeinsparungen erzielt werden können. Beide Lösungen wurden auf unterschiedlichem technischem Weg realisiert und befinden sich nach wie vor im Prototypenstadium. Mit dem Bericht soll nun die Industrie bewogen werden, basierend auf den Erfahrungen dieser zwei Pilotanlagen eine Kommerzialisierung durch Direktimplementierung in die Server durchzuführen. Diesbezügliche Gespräche haben bereits stattgefunden, wobei aber

die Branche der Idee eher mit Skepsis begegnet.

b) Kraft / elektrische Motoren

In diesem Bereich stehen mehrere Pilot- und Demonstrationsprojekte an. Aufgrund diverser Verzögerungen werden diese Projekte erst 2001 gestartet. Bei den verschiedenen Kontakten mit der Industrie hat sich auch gezeigt, dass das Thema Energieeffizienz eher als zweitrangig betrachtet wird.

c) Diverse

Das BFE verfügt zur Zeit nur in beschränktem Rahmen über aussagekräftige statistische Daten zur kontinuierlichen Bestimmung der Veränderungen des Elektrizitätsverbrauchs pro Verbrauchergruppe. Aus diesem Grund wurden zwei **Machbarkeitsstudien** durchgeführt, welche in verschiedenen Bereichen/Segmenten die möglichen Datenquellen, das Vorgehen zur Datenerhebung und -verarbeitung sowie die diesbezüglich einmaligen sowie wiederkehrenden Kosten eruiert. In einem ersten Bericht wurden die Verbrauchergruppen **Beleuchtung, Haustechnik, Mobilität und gewerbliche Anwendungen** [12] untersucht. In einer zweiten, parallel laufenden Studie wurden die Bereiche **Haushaltsgeräte, Unterhaltungselektronik, Büro- und Kommunikationstechnik** sowie **Industrie (Motoren)** [13] betrachtet. Diese acht Bereiche decken etwa 80% des gesamten Elektrizitätsbereichs ab. Damit stehen dem BFE ausreichende Entscheidungsgrundlagen zur Verfügung, um die Datenstatistik in den relevanten Segmenten zu verfeinern.

Unverändert wird zur effizienten Verbreitung der Resultate die programmeigene *Internet-Home-Page* [19] betrieben. Alle verfassten Berichte können dort kostenlos als PDF-File heruntergeladen werden.

Obwohl das Konzept neuartiger Kochplatten unbestreitbare energetische Vorteile bringen würde, musste die Programmleitung im Verlaufe des Jahres 2000 zur Kenntnis nehmen, dass die beauftragte Unternehmung im Projekt **Feldtest von Hochleistungskochsystemen** aufgrund diverser Managementprobleme Konkurs ging. Auch die beteiligte Industrie zog sich sukzessive aus dem Projekt zurück. Unter diesen Voraussetzungen konnte das Projekt nicht mehr weitergeführt werden und musste auch seitens des BFE abgebrochen werden.

Bewertung 2000 und Ausblick 2001

Die Zielsetzung, aufbauend auf den vier erarbeiteten Schwerpunkten ein kohärentes *Gesamtkonzept Elektrizität* auszuarbeiten, konnte erreicht werden. Der entsprechende Konzeptbericht liegt seit Herbst 2000 vor und wird anfangs 2001 der eidg. Energiefor-

schungskommission (CORE) vorgestellt.

Es ist erfreulich, dass das *IEA-Implementing Agreement über die Hochtemperatursupraleitung* für weitere drei Jahre erneuert werden konnte. Weniger positiv

war der Projektabbruch des ambitionierten *HTSL-Trafos im 10 MVA-Bereich*. Zumindest ergab sich die relevante Erkenntnis, dass im AC-Bereich die Herstellung von langen Drähten prozesstechnisch noch schwierig zu beherrschen ist. Für 2001 ist geplant, im *HTSL-Bereich neue Systemstudien* zu initiieren.

Leider konnte nicht, wie beabsichtigt, die Thematik der Einbindung von erneuerbaren Energieerzeugern ins Verteilnetz mit einem Projekt konkretisiert werden. Die diesbezüglichen vorbereitenden Arbeiten laufen nun aber und es ist vorgesehen, 2001 ein umfassendes, diesbezügliches Projekt unter Einbindung mehrerer E-Werke sowie der Industrie zu starten. Eine Einbindung von Fachhochschulen wird dabei ebenfalls mitberücksichtigt.

Im Bereich der *Energie- und Informationstechnik* konnten mit der Studie über die Haushaltsvernetzung Erkenntnisse gewonnen werden, die auch für ein internationales Publikum von Interesse sind und als Grundlage für regulatorische Massnahmen verwertet werden könnten. Diese Ergebnisse sollen deshalb einem breiten internationalen Publikum bekannt gemacht werden. Auch die Erkenntnisse der Umfrage

bei KMU bezüglich dem Abschalten von Servern über Nacht und an Wochenenden werden im nächsten Jahr verstärkt publiziert. Für die effiziente Umsetzung ist zudem beabsichtigt, stark mit der neu etablierten *Energieagentur* zusammenzuarbeiten.

Der Abbruch des Projekts *Feldtest von Hochleistungskochsystemen* aufgrund des Konkurses des federführenden Industriepartners konnte trotz verschiedenen Anstrengungen und Interventionen seitens der Programmleitung nicht verhindert werden. Es bleibt zu hoffen, dass die energetisch interessante Entwicklung durch die einschlägige Industrie aufgenommen wird.

Die kurz vor dem Abschluss stehende Vereinbarung mit der EU-Kommission bezüglich der *Auslege-Software OPAL* ist sicher positiv zu werten. Auch dass bei den Vorbereitungen für ein *internationales Projekt für die Promotion der effizienten Motoren* mitgearbeitet werden konnte, ist von grosser Bedeutung. Leider war bis anhin der Erfolg, neue Erkenntnisse im *Bereich Antriebe* umzusetzen und in P+D-Projekten zu erproben, eher mässig. Die diesbezüglichen Anstrengungen sollen deshalb verstärkt werden.

Liste der Projekte

(JB) Jahresbericht 2000 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

Alle Berichte sind bei <http://www.electricity-research.ch> abrufbar.

- [1] H. Glavitsch, *Nussbaumen: Study on methodologies for establishing a system for cross-border tariffication in the internal electricity market* (JB)
- [2] D. Westermann, ABB HOCHSPANNUNGSTECHNIK, Zürich: *Entwicklung neuer systemorientierter FACTS-Elemente* (SB)
- [3] P. von Burg, ASPES, Zürich: *Flywheel energy storage for wind power generation FlyWip* (JB) <http://www.flywip.com>
- [4] G. Schnyder, ABB SÉCHERON, Genf: *Systemstudie "Hochtemperatur-Supraleitung im Netz"* (SB)
- [5] H. Züger, ABB SÉCHERON, Genf: *10 MVA-HTSL-Transformator* (SB)
- [6] G. Véscey, EPF-Lausanne: *Assessing the Impacts of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector* (JB)
- [7] B. Aebischer, ETH-Zürich: *Betreuung des Kompetenzzentrums Energie- und Informationstechnik* (JB) • *Vernetzung im Haushalt* (JB/SB) <http://www.cepe.ethz.ch>
- [8] S. Frauenfelder, L. Bernays, LINDER KOMMUNIKATION AG, Zürich: *Untersuchung des Verhaltens von Endbenutzern bezüglich Ein- und Ausschalten von PCs* (SB)
- [9] M. Gubler, M. Peters IPSO – ein Kompetenzzentrum der IHA-GfM, Dübendorf: *Servernutzung in Klein- und Mittelbetrieben* (SB)
- [10] R. Gloor, GLOOR ENGINEERING, Sufers: *Marktuntersuchung für ein Prüfinstitut Antriebssysteme* (SB) • *Energieeinsparungen bei Druckluftanlagen in der Schweiz* (SB)
- [11] A. Huser, ENCONTROL, Niederrohrdorf: *Schalten von Servern* (SB)
- [12] C.U. Brunner, CUB, S. Gasser, E-TEAM, H. Glauser, E A SI, R. Gloor, GLOOR ENGINEERING, S. Lingenhel, E-VIVA, U. Steinemann, INGENIEURBÜRO US: *Machbarkeitsstudie Datenerhebung in den Bereichen Beleuchtung, Haustechnik, Mobilität, gewerbliche Anwendungen* (SB)

- [13] A. Huser, ENCONTROL GMBH, B. Schaltegger, MEYER & SCHALTEGGER, W. Baumgartner, BASICS: *Machbarkeitsstudie Datenerhebung in den Bereichen Unterhaltungselektronik, Büro- und Kommunikationstechnik, Haushaltgeräte, Industrie (Motoren)* (SB)

Referenzen

- [14] J. Reichert, Fraunhofer Institut, *Karlsruhe*; U. Rath, EBÖK, *Tübingen*: *Massnahmen zur Förderung der rationellen Energienutzung bei elektrischen Antrieben*
- [15] R. BRÜNIGER, *Ottenbach*: *Reisebericht* über die EU-Konferenz *2nd International Conference on Energy Efficiency in Household Appliances and Lightning*, September 2000
- [16] C. Schierz, C. Müller; *ETH-Zürich*; Projekt Nemesis: *Niederfrequente elektrische und magnetische Felder und Elektrosensibilität in der Schweiz* (Tagungsband)
- [17] <http://www.psel.ch>
- [18] <http://www.radio.fer.hr/cost244/>
- [19] <http://www.electricity-research.ch> / <http://www.energielabel.ch>
- [20] <http://www.ee.ethz.ch/research/power/index.de.html>
- [21] <http://www.epfl.ch>

UMGEBUNGS- UND ABWÄRME, WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 2000

Martin Zogg
martin.zogg@bluewin.ch



Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt

Funktionsmuster einer Wärmepumpe mit hohem Temperaturhub für die Sanierung bestehender Zentralheizungen auf dem Prüfstand. Aufnahme aus dem Projekt [23].

Programmschwerpunkte und Programmziele

Die Erzeugung von Niedertemperaturwärme für Raumheizung, Warmwasserbereitung und industrielle Prozesse benötigt über die Hälfte des gesamten Endenergiebedarfs der Schweiz. Das vorliegende Forschungsprogramm will die Grundlagen schaffen, um in Zukunft einen wesentlich **höheren Anteil der Niedertemperaturwärme aus Umgebungswärme** (Luft, Erdboden, Grund- und Oberflächenwasser) **oder aus Abwärme** gewinnen zu können als heute. Durch die Kombination von Elektrowärmepumpen mit effizienten Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen oder modernen Kombikraftwerken aber auch mit fortgeschrittenen Absorptionswärmepumpen lassen sich gegenüber den üblichen Öl- und Gasheizkesseln **bereits heute 30% bis 50% Brennstoffen einsparen** und damit die **CO₂-Emissionen** entsprechend **reduzieren** [36]. In Zukunft sind noch deutlich höhere Einsparungen möglich. Die Wärmepumpentechnologie hat deshalb nichts an Aktualität eingebüsst [33]. Zur Verbesserung der

Effizienz, der Betriebssicherheit und zur Reduktion der Kosten dieser Systeme sowie einer energieoptimalen Konzeption industrieller Prozesse wurden im Jahr 2000 die folgenden **Hauptziele** verfolgt:

- **Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt:** Erarbeiten von Grundlagen zur Entwicklung einer kostengünstigen Wärmepumpe für hohe Temperaturhübe.
- **Systemoptimierung:** Entwickeln neuer Methoden für die **Betriebsüberwachung**, das **Testen**, das **Optimieren** und das **Regeln** von Wärmepumpenheizungssystemen; Erarbeiten von **Standardschaltungen** für Wärmepumpenheizungssysteme bis 30 kW.
- **Prozessintegration:** Weiterentwickeln und Umsetzen der Methoden zur Reduktion des Energiebedarfs komplexer industrieller Prozesse.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

WÄRMEPUMPEN

In der Schweiz wird bereits jeder dritte Neubau mit Wärmepumpen beheizt. Im wesentlich grösseren **Sanierungsmarkt** kommt es dagegen erst zu gelegentlichem Wärmepumpeneinsatz. Das Hauptgewicht der Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen wurde deshalb auf eine für den Sanierungsmarkt geeignete Wärmepumpe gelegt. Das Pflichtenheft des Bundesamts für Energie (BFE) für die Entwicklung einer **Swiss Retrofit Heat Pump (SRHP)** stellt folgende Anforderungen an eine solche Wärmepumpe: Sie muss grosse Temperaturunterschiede zwischen der Wärmequelle und den Wärmebezüglern mit hoher Effizienz bewältigen können. Sie muss auch bei tiefen Aussentemperaturen eine hohe Wärmeleistung aufweisen, um einen monovalenten Betrieb zu gewährleisten. Weiter muss die Überhitzung des Kältemittels im Kompressor begrenzt bleiben. Im Rahmen einer Ausscheidung zur **SRHP** wurden vier Funktionsmuster eingereicht und im Sommer 2000 durch Messungen im Wärmepumpentestzentrum Töss geprüft und einer detaillierten Kostenanalyse unterzogen. Die im Rahmen des Projekts [23] entwickelte Versuchsanlage kam den BFE-Anforderungen am nächsten. Da sie einen deutlichen Entwicklungsschritt für Wärmepumpen im Sanierungsmarkt darstellt, wurde das Funktionsmuster von einer unabhängigen Jury einstimmig für die Felderprobung in der Heizperiode 00/01 ausgewählt [24]. Die übrigen Teilnehmer der Ausscheidung haben ebenfalls mit grossem Einsatz interessante Lösungen realisiert. Sie konnten aber leider für die Felderprobung nicht berücksichtigt werden. Wärmepumpen mit hohem Temperaturhub legen die

Verwendung echt zweistufiger Wärmepumpenprozesse mit zwei Kompressoren und einem Kältemittelkreislauf nahe. Diese sind recht aufwendig und haben mit dem Problem der Schmierölverschiebung zwischen den Kompressoren zu kämpfen. Diesem Phänomen wird in [19] nachgegangen.

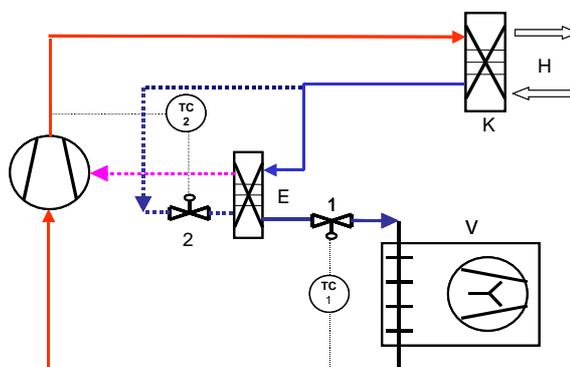


Bild 1: Wärmepumpenprozessvariante für grossen Temperaturhub mit Zwischendruckansaugung und Economizer (E). (H) Wärmeabgabe an Heizung, (K) Kondensator, (V) Verdampfer mit Umgebungsluft als Wärmequelle, (1) Expansionsventil für Hauptstrom, (2) Expansionsventil für Nebenstrom.

Vorerst drängen sich einfachere Lösungen mit **einem Kompressor und Zwischendruckansaugung** auf (Bild 1). Diese vermögen die erwähnten Anforderungen ebenfalls zu erfüllen. Allerdings fehlt zurzeit auf dem Markt ein dafür optimierter Scrollkompressor.

Der Idee eines Wärmepumpenprozesses auf der Basis von Bild 1 wurde mit einem kommerziellen Kom-

pressor und einem Prototypen nachgegangen. **Kommerzielle Scrollkompressoren** mit Zwischenansaugung sind für das Einspritzen einer flüssigen Phase ausgelegt. Eine Versuchswärmepumpe mit einem Kompressor dieses Typs und R407C als Kältemittel zeigte gegenüber konventionellen einstufigen Wärmepumpenprozessen mit zunehmendem Temperaturhub trotzdem bereits wesentliche Verbesserungen [23]. Bei $-10^{\circ}\text{C} / 60^{\circ}\text{C}$ wurde bei geringfügig höherer Leistungszahl eine Erhöhung der Heizleistung um 15% und eine Reduktion der Verdichtungsendtemperatur um über 20°C gemessen.

Optimal für einen Wärmepumpenprozess gemäss Bild 1 wäre ein Scrollverdichter, welcher bei thermodynamisch optimalem Zwischendruck höhere Zwischenansaugvolumenströme ermöglicht. In Projekt [17] wurde ein Wärmepumpenprozess mit einem entsprechend für diesen Einsatz optimierten **Prototypen eines Scrollverdichters** untersucht. Dieser wurde ebenfalls mit R407C als Kältemittel und gegenüber dem Prozess in Bild 1 einem zusätzlichen Sauggasüberhitzer ausgestattet. Mit diesem neuen Scrollverdichter wurden durch die Zwischenansaugung bei hohen Temperaturhuben Erhöhungen der Leistungszahl um bis zu 15% und der Wärmeleistung um bis zu 30% erreicht (Werte für Luft -7°C , Wasser 60°C). Es ist zu hoffen, dass dieser Verdichterprototyp bald Eingang in die Serieproduktion finden wird. Die Untersuchungen werden in einer weiteren Projektphase vertieft [18]. Dabei wird das Abtauen des Verdampfers optimiert und versucht den Prozess zu vereinfachen.

Der **Flügelzellenverdichter** ist für die Realisierung von Wärmepumpenprozessen mit Zwischenansaugung (Bild1) ebenfalls geeignet. Dieser könnte im Gegensatz zu Scrollverdichtern dank Drehzahlvariation in einem sehr weiten Bereich betrieben werden, was eine bessere Anpassung an den praktischen Wärmepumpenheizungsbetrieb ermöglicht. Ein vielversprechendes Baumuster aus dem Bereich der Transportkühlung wurde deshalb einer eingehenden experimentellen Analyse unterzogen [7]. Dabei ergaben sich zwischen den Messergebnissen und den Herstellerangaben erhebliche Unterschiede, denen in einer nächsten Projektetappe nachgegangen wird. Dabei soll die Schmierölabscheidung verbessert werden. Der in [7] untersuchte Flügelzellenverdichter wurde auch für das Vorhaben „**Kleinwärmepumpe mit Ammoniak** als Kältemittel“ [9] verwendet. Im Berichtsjahr konnte das Funktionsmuster trotz vieler Hürden (Ölabscheidung, mangelhafte Informationen des Verdichterherstellers, Beschaffung kleiner ammoniakverträglicher Armaturen, Verschmutzung im Kältemittelkreislauf, Geschäftsleitungswechsel in der beteiligten Firma) erstmals bis zu $-15^{\circ}\text{C}/65^{\circ}\text{C}$ betrieben werden (Bild 2). Es erreichte bei $-16.5^{\circ}\text{C}/51.5^{\circ}\text{C}$ ohne Abzug der Pumpleistung für den Erdwärmesonden-Kreislauf den respektablen Gütegrad von 0.50. ($\text{COP} = 2.4$). In einer zweiten Projektetappe soll nun für den noch unbefriedigenden Ölkreislauf eine praxistaugliche Lösung gefunden wer-

den. Weiter ist die ins Wärmepumpengehäuse integrierte Ammoniakfalle für den Leckagefall zu testen.



Bild 2: Funktionsmuster einer Kleinwärmepumpe mit Ammoniak als Kältemittel, aus [9].

Bei Wärmepumpen erfolgt das Abtauen im Wesentlichen durch Prozessumkehr und durch Heissgasabtauung. Die **Abtauverluste** erreichen bei Luft/Wasser-Wärmepumpen 10% bis 15% des gesamten Bedarfs an elektrischer Energie. Verbesserungen bei den Abtaumethoden könnten somit wesentlich zum Anheben der Jahresarbeitszahl beitragen. Aus diesem Grund wird in [8] nach Verbesserungen beim Abtauen von Verdampfern mit Luft als Wärmequelle gesucht. In der ersten Phase des Projekts wurden die beiden gängigen Abtaumethoden einer eingehenden Analyse unterzogen. Beide Abtauprozesse erweisen sich aufgrund einer detaillierten thermodynamischen Analyse zumindest bei höheren Temperaturen auf der Wärmeabgabeseite als energetisch vergleichbar. Die indirekten Verluste bei der Prozessumkehr relativieren den allgemein postulierten energetischen Vorteil der Prozessumkehr gegenüber der Heissgasabtauung. Problematisch bei der Heissgasabtauung ist die geringe Heizleistung. Ein vollständiges Abtauen der ganzen Verdampferoberfläche ist oft nicht gewährleistet. Im Schlussbericht werden auch alternative Abtaumethoden angesprochen. Weiter werden die in der Praxis realisierten Strategien wie auch noch nicht erprobte Vorschläge zum Ein- und Ausleiten der Abtauung analysiert. In den nächsten Projektphasen ist für einen fundierten Vergleich gängiger Abtaumethoden die Analyse einer grossen Zahl ausgemes-

sener Luft/Wasser-Wärmepumpen vorgesehen. Darauf aufbauend sollen Verbesserungen erarbeitet und getestet werden.

Die umfassende Ökobilanz zur **Umweltverträglichkeit von Kältemitteln** ([34, 36]) fand auch im Jahr 2000 grosses internationales Interesse [27]. Das natürliche Kältemittel CO₂ ist für Wärmepumpen ein – auch bezüglich energetischer Effizienz – interessantes Kältemittel, wenn die Wärme bei einer grossen Temperaturänderung des wärmeaufnehmendem Mediums abgegeben werden kann. Dies ist namentlich bei der Warmwasserbereitung der Fall, wo die Wassertemperatur in der Wärmepumpe von 10°C auf 50°C oder mehr erhöht werden muss. Für den Bau entsprechender Wärmepumpen fehlt bisher ein geeigneter Verdichter. In einem neuen Projekt [1] wird ein **ölfreier, semihertmetischer CO₂-Kompressor** für überkritische Wärmepumpprozesse mit grossen Temperaturhüben gebaut. Bei diesem treten Ansaugdrücke um 35 bar und Enddrücke um 80 bis 150 bar auf. Das Funktionsmuster wird eine elektrische Leistungsaufnahme von etwa 500 Watt aufweisen und wird im nächsten Jahr in einem geschlossenen Heissgasprozess getestet werden. Mit diesem Projekt beteiligen wir uns an einem Vorhaben der internationalen Energieagentur.

BLOCKHEIZKRAFTWERKE

Die Kombination von Blockheizkraftwerken mit Wärmepumpen ermöglicht Wärmeenergieerzeugungsgrade über 150%. Der wunde Punkt bei den Blockheizkraftwerken sind die gemäss geltender

Luftreinhalteverordnung (LRV 98) zugelassenen hohen Emissionen an Stickoxiden (Näheres in [36], Rubrik „Publikationen“). Aus diesem Grund wird vom Bundesamt für Energie seit 1995 die Entwicklung eines besonders schadstoffarmen Motors mit hohem mechanischem Wirkungsgrad unterstützt. Nun liegen mit einem neuen Konzept eines aufgeladenen Gasmotors mit Abgasrückführung (Bild 3) sehr erfreuliche Resultate vor. Der als **SwissMotor** bezeichnete Motor eines schweizerischen Herstellers erreicht gegenüber konventionellen Motoren mit stöchiometrischem Betrieb einen um rund 20% höheren mechanischen Wirkungsgrad (über 40% im Leistungsbereich von 200 kW!), bei gleichem Hubvolumen um etwa 60% höhere Leistung und wesentlich tiefere Emissionswerte. Nun konnte auch die Regelung zur automatischen Anpassung des Motorbetriebs und des Abgasnachbehandlungssystems an die Variation der Motorlast und der Erdgaszusammensetzung erfolgreich entwickelt und experimentell erprobt werden [15]. Nicht nur im stationären Betrieb sondern auch bei variabler Motorleistung wurden die Abgasemissionen deutlich unter die sehr strengen Grenzwerte der Stadt Zürich gesenkt. In einer nächsten Phase wird das Regelungskonzept auf das für den praktischen BHKW-Betrieb notwendige vereinfacht. Es ist zu hoffen, dass die anschliessende Felderprobung dem weltrekordverdächtigen **Swiss-Motor** den Weg für den kommerziellen Einsatz in Blockheizkraftwerken mit höchsten elektrischen Wirkungsgraden und geringsten Emissionen ebnet wird. Damit wird ein neuer Stand der Technik erreicht und es wird Zeit, die Emissionsanforderungen der LRV 98 wieder auf jene der LRV 92 zu senken!

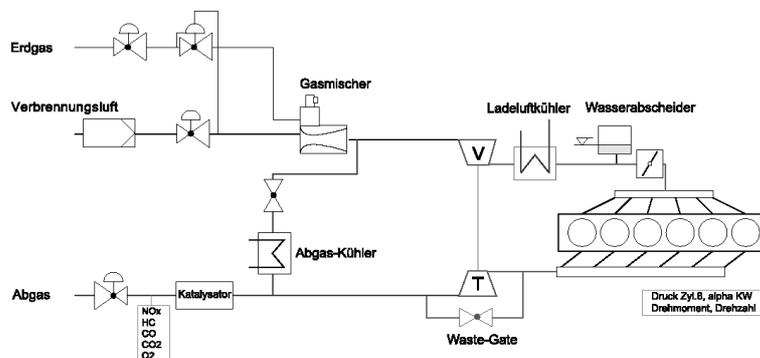


Bild 3: Versuchsanordnung zur Erprobung der Regelung des SwissMotors für Betrieb bei Teillast und variabler Erdgaszusammensetzung, aus [15].

SYSTEMOPTIMIERUNG

Bei Wärmepumpenheizungssystemen ist die Wechselwirkung zwischen Gebäude, Wärmeverteilungssystem, Wärmespeichersystem, Wärmepumpe und Wärmequelle offensichtlich. Gute Lösungen sind nur durch Einbeziehung des Gesamtsystems zu erzielen. Hier sind noch bedeutende Fortschritte möglich.

In einer neuen Studie [3] soll das Potenzial der Nutzung der in natürlichen **geologischen Schotterformationen** der Schweiz auf rund 10°C vorgewärmten

Luft als Wärmequelle für Wärmepumpen geklärt werden. Die **BFE-Programme WPCalc und WKKcalc** zur Auslegung von Wärmepumpen- und BHKW-Heizungsanlagen sollen gründlich überarbeitet werden. In einem Vorprojekt [10] soll nach Lösungen zum Ersatz der bisherigen Tagesgangmethode für den Wärmebedarf des Gebäudes durch eine vereinfachte Gebäudesimulation gesucht werden. Die entsprechenden Programme könnten dann auch zur Beurteilung von Regelstrategien genutzt werden. Weiter soll basierend auf einer Benutzerumfrage ein Pflichtenheft für die neuen Pro-

grammversionen ausgearbeitet werden. Als Sofortmassnahme wird das in einem früheren BFE-Projekt entwickelte **Berechnungsmodul für Erdwärmesonden EWS** (Näheres in [36]) ins Programm *WPCalc* implementiert [22]. Aus Kostengründen kommt die Planung von Kleinwärmepumpenanlagen oft zu kurz. In einem neuen Vorhaben werden deshalb für Kleinwärmepumpenanlagen bis 30 kW Heizleistung **Standardschaltungen** mit einfachen Dimensionierungstabellen erarbeitet [6]. Dabei 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 Wärmeabgabe an den variablen Wärmeleistungsbedarf einer Wärmepumpenheizung erfolgt im Allgemeinen durch getakteten Betrieb der Wärmepumpe. Die durch das An- und Abstellen verursachte Minderung der Nutzwärmeproduktion gegenüber dem stationären Dauerbetrieb sind noch wenig erforscht. In der ersten Phase eines Forschungsprojekts zur Entwicklung von Messverfahren für den **dynamischen Wärmepumpentest** wurden die nach dem Ein- und Ausschalten ablaufenden physikalischen Vorgänge erfasst, modelliert und durch Simulationsrechnungen nachgebildet [13]. Das gleichzeitig entwickelte mathematische Modell für den instationären Verlauf der Wärmepumpenleistung vermag die Abhängigkeit der Minderleistung von der Zykluszeit und der Einschaltzeit vergleichbar wiederzugeben. In einer kommenden zweiten Projektphase wird dieser Ansatz an einer Sole/Wasser- und an einer Luft/Wasser-Wärmepumpe erprobt und nötigenfalls modifiziert. Anschliessend wird ein möglichst einfach durchzuführendes Testprozedere ausgearbeitet.

Ziel des Forschungsvorhabens **Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen** ist es, die wichtigsten Kenngrössen von Wärmepumpenheizungssystemen aus möglichst wenigen, kostengünstigen Betriebsmessungen an installierten Anlagen in kurzer Zeit zu bestimmen. Damit soll eine bessere Betriebsoptimierung und Regelung sowie eine kontinuierliche Betriebsüberwachung erreicht werden. In einer späteren Phase ist die Umsetzung in die Praxis durch die Spezifikationen eines Einbausets für Wärmepumpen und eines Diagnosesets für den temporären Anschluss eines externen Computers für umfangreichere Diagnosen geplant. Die in der 4. Projektphase entwickelte neue Methode *FuzzyWatch* zur Betriebsüberwachung von Wärmepumpen und Kältemaschinen bedarf einer weitergehenden experimentellen Erprobung. Zu diesem Zweck wird in der 5. Projektphase [14] ein dynamischer Wärmepumpenprüfstand (Bild 4) aufgebaut. Dieser erlaubt es, zu entdeckende Fehler in der Wärmepumpe aber auch im ganzen Wärmepumpenheizungssystem vorzutäuschen. Damit kann *FuzzyWatch* mit realen Wärmepumpen trainiert werden. Parallel dazu wird ein physikalisches Wärmepumpenmodell zum rechnerischen Trainieren der neuen Methode entwickelt und

später am Prüfstand validiert. Der Prüfstand soll auch den Wärmebedarf des Gebäudes vortäuschen können und wird damit der Weiterentwicklung der Pulsbreitenmodulation dienen.

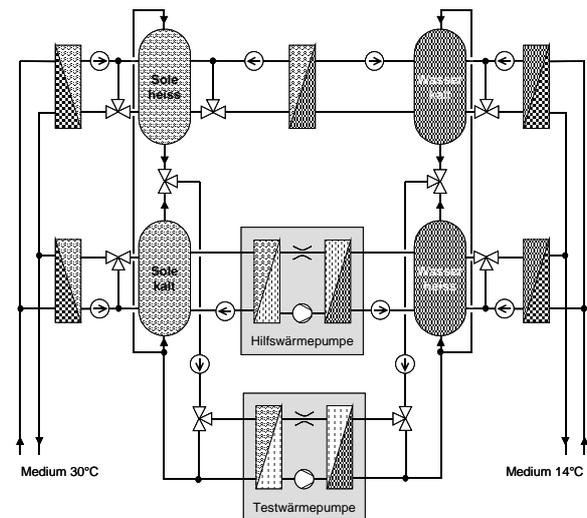


Bild 4: Fließbild des dynamischen Wärmepumpenprüfstands (aus [14]).

Die Phase 1 des Vorhabens „**Regelung von Wärmepumpen durch Pulsbreitenmodulation**“ zeigte die Vorteile dieses Konzepts (Näheres in [36]). In der zweiten Phase folgt eine Verfeinerung und weitere Erprobung sowohl des energiekenlinienbasierten wie auch des modellbasierten Ansatzes unter Beteiligung von zwei Industriepartnern [11]. Die für 2001 geplanten Versuche mit entsprechenden Regelungsvarianten der Wärmepumpenheizung werden in einem Haus mit einer typischen Charakteristik für Heizungssanierungen durchgeführt. Die Messungen liefern auch einen realistischen Wärmebedarfsdatensatz für spätere experimentelle Untersuchungen am Prüfstand (Bild 4). Fernziel des Vorhabens ist eine Regelung, welche die massgebenden Einflussgruppen nach einer Inbetriebnahmephase selbst identifiziert und dann die Wärmepumpe automatisch, anhand dieser Parameter, optimal regelt.

Bei **Niedrigenergiehäusern** (z.B. nach Minergiestandard) sinkt der Heizleistungsbedarf von Gebäuden auf rund die Hälfte des Bedarfs konventioneller Bauten. Damit steigt der Wärmebedarfsanteil für die Warmwasserbereitung auf 30% bis 40% des gesamten Wärmebedarfs. Dies stellt neue Anforderungen an die Heizsysteme, die kostengünstig und mit möglichst geringer Umweltbelastung zu erreichen sind. Aufgrund der theoretischen Überlegungen und der Laborversuche wurden in der Phase 3 neue Niedrigenergiehäuser entsprechend ausgerüstet und in den Heizperioden 98/99 und 99/00 wurden neue Niedrigenergiehäuser praktisch erprobt [4]. Die einfachen, speicherfreien Systeme (Bild 5) mit Fussbodenheizung ergaben die in Bild 6 dargestellten mittleren Nutzungsgrade (Verhältnis der abgegebenen Wärme zur zugeführten elektrischen Energie). Bei der Beurteilung dieser Resultate ist zu beachten, dass es in erster Linie um die Tauglichkeit der

vorgeschlagenen einfachen Konzepte ging. Eine Verbesserung der erreichten Nutzungsgrade ist durchaus noch möglich. Ein drittes Niedrigenergiehaus wurde mit Luft als Wärmeverteilungssystem ausgestattet. Dieses System verspricht zwar ein sehr interessantes Preis/Leistungsverhältnis, doch traten noch zu viele Kinderkrankheiten auf. Eine abschliessende Beurteilung ist daher noch nicht möglich.

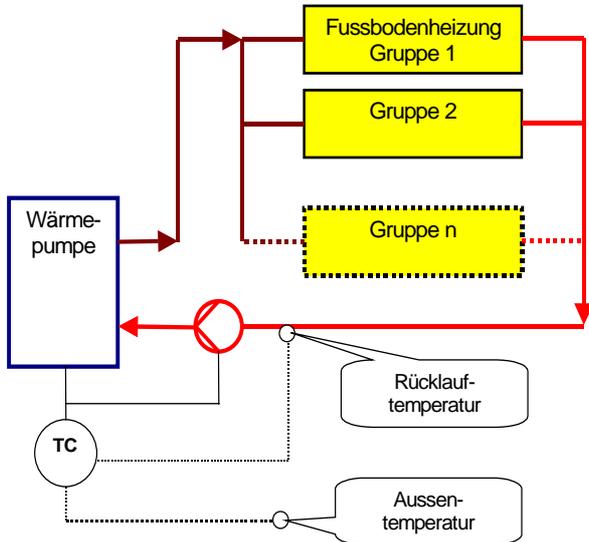


Bild 5: Einfache hydraulische Einbindung und Regelung einer Wärmepumpe mit Niedrigtemperatur-Fussbodenheizung.

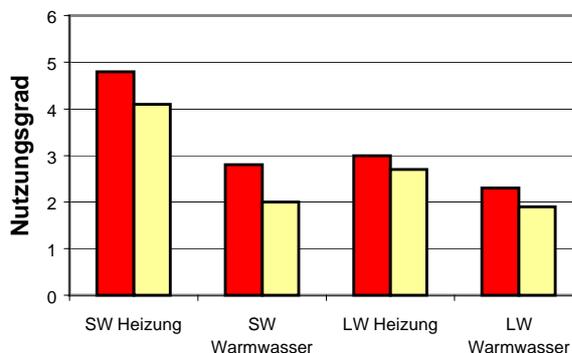


Bild 6: Vergleich der Nutzungsgrade der untersuchten Systeme für die Raumheizung und für die Warmwasserbereitung für Mai 1999 bis April 2000. Links: Wärmeerzeugung, rechts: nach Wärmeverteilung. SW: Erdwärmesonde als Wärmequelle, Warmwasserbereitung mit Beistellboiler, alternativ zur Heizung; LW: Umgebungsluft als Wärmequelle, Warmwasserbereitung mit separatem Wärmepumpenboiler.

Die Erkenntnisse dieses umfangreichen Forschungsprojekts zum Bau kostengünstiger Wärmepumpenheizungen für Niedrigenergiehäuser mit einem Jahresheizwärmebedarf für die Raumheizung unter $200 \text{ MJ/m}^2\text{a}$ (oder $55 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) und hydraulischer Wärmeverteilung wurden in einem **technischen Handbuch** zusammengefasst [5]. Dieses dient insbesondere zur Auslegung von Wärmepumpenheizungen für Wohnbauten nach dem Minergiestandard. Das

Handbuch gibt aber auch einen Ausblick auf Passivhäuser mit noch deutlich geringerem Jahresheizwärmebedarf [25, 26].

In der geschickten **Nutzung der Abwärme von Gewerbekälteanlagen** liegt ein erhebliches Energie-sparpotenzial. Bei der Gewerbekälte (Kühlräume und Kühlmöbel in Gewerbebetrieben) fällt der Kältebedarf im Allgemeinen ganzjährig etwa konstant an. Der aussentemperaturabhängige Wärmebedarf zur Raumheizung besteht nur im Winter. Da im Sommer nur ein Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung vorhanden ist, besteht ein Interesse einer saisonalen Speicherung der Abwärme der Kälteanlagen mit Erdwärmesondenfeldern. Dieses kann nach der Auskühlung im Winter auch zur direkten Raumkühlung genutzt werden. Je nachdem, ob ein Eintragsüberschuss (im Sommer) oder ein Entzugsüberschuss (im Winter) besteht, ist das Erdwärmesondenfeld für den Sommerbetrieb oder den Winterbetrieb zu dimensionieren. Das dazu empfohlene Vorgehen wird in einem Handbuch ausführlich zusammengestellt und an einem Beispiel aus der Praxis illustriert [12, 28, 29].

ABWÄRMENUTZUNG BEI PROZESSEN

Im Bereich der **Abwärmennutzung** bei industriellen Prozessen konzentrierten sich unsere Forschungs-bemühungen auf die in der Schweiz wichtigen Batch-Prozesse und die Lösungsmittelbewirtschaftung. In einem neuen Vorhaben werden **Batch-Prozesse** anhand eines repräsentativen Beispiels aus der chemischen Industrie mit einem Jahresgesamtenergiebedarf von über 20 GWh und Energiekosten von über 1.75 Millionen Franken eingehend analysiert (Bild 7). Nach einer Vertiefung dieser Analysen sollen die Erkenntnisse für unterschiedliche Batch-Anlagen verallgemeinert werden. Die energetische Konzeption und Optimierung von Wärmeübertragernetzwerken für Batch-Prozesse wird in [16] mit genetischen Algorithmen angegangen. Dabei werden sowohl die Fälle mit Wärmepufferspeichern wie auch jene mit direkter Wärmeübertragung ohne Speicher untersucht.

Für den Energiebedarf der chemischen Prozesstechnik spielen Herstellung und Entsorgung von Lösungsmitteln eine bedeutende Rolle. Die aktuelle Situation der **Lösungsmittelbewirtschaftung in der chemisch-pharmazeutischen Industrie** der Schweiz wurde deshalb detailliert analysiert [20]. Die Verbrennung mit Abwärmennutzung von Abfalllösungsmitteln und die Wiedergewinnung durch Rektifikation sollen anhand einer Ökobilanz verglichen werden. Dazu wird mit Daten aus einem grossen Industriebetrieb eine geeignete Methodik entwickelt. Toluol-Wasser dient als Referenzgemisch.

Erwähnt sei in diesem Zusammenhang auch, dass im Rahmen des im *IEA-Implementing Agreement on Process Integration* mit Unterstützung der Schweiz eine ausgezeichnete Einführung und Übersicht zur Prozessintegration verfasst wurde [30].

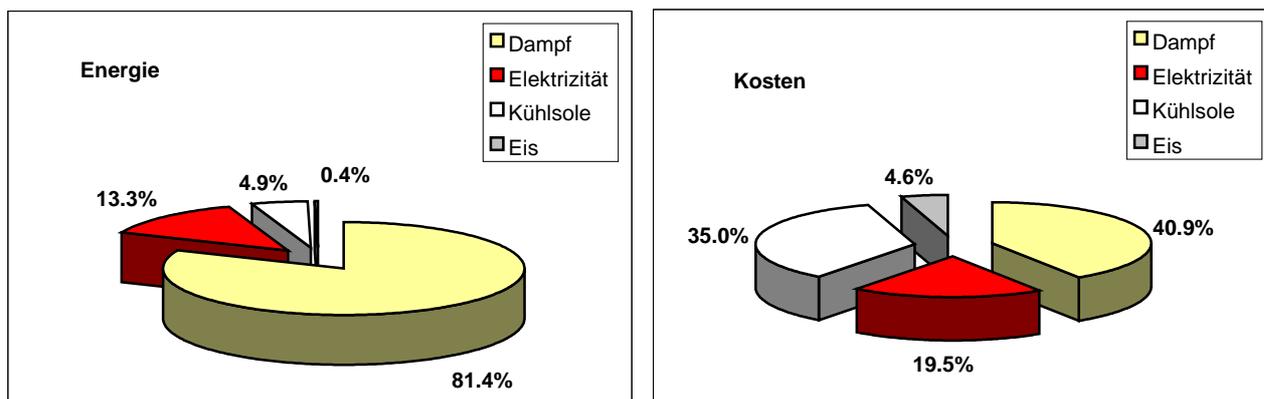


Bild 7: Erste Ergebnisse für Energiebedarfs- und Kostenstruktur in dem in [21] untersuchten Batch-Betrieb im Jahr 1999

Nationale Zusammenarbeit

Die Aktivitäten des Energieforschungsfonds der Schweizerischen Gasindustrie *FOGA* wie auch des Forschungsfonds der Schweizerischen Erdölvereinigung *FEV* im Bereich der Wärme-Kraft-Kopplung erlaubte uns eine Konzentration der beschränkten Mittel auf den Wärmepumpenbereich. Mit dem *FOGA* und den *FEV* wurde die Weiterentwicklung der Diffusions-Absorptionswärmepumpe reaktiviert. Unsere Anstrengungen für eine thermodynamisch sinnvollere Erzeugung der Niedertemperaturwärme wird mit dem Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft *PSEL* koordiniert. Das BFE, zusammen mit dem *PSEL*, diversen nordostschweizerischen Elektrizitätswerken, dem Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke *VSE* und der *VEW Energie AG* in Dortmund, unterstützte das *Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss* und dessen Arbeit im Bereich Qualitätssicherung von Wärmepumpen. Dieses auch international anerkannte Prüfinstitut wird durch die Nordostschweizerischen Kraftwerke *NOK* und das Elektrizitätswerk der Stadt

Zürich *EKZ* betrieben. In der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz *FWS* arbeiten das BFE, Branchenverbände von Planern und Installateuren, Hersteller und Anbieter von Wärmepumpen, Elektrizitätswerke und Dienststellen von Kantonen zusammen zur Verbreitung zuverlässiger, effizienter und preiswerter Wärmepumpenheizungsanlagen. Das Gütesiegel für Wärmepumpen hat sich im Markt etabliert. Eine Gütesiegelkommission für Erdwärmesonden wurde neu gegründet. Zur Qualitätssicherung ist ein nationales Weiterbildungsmodul zum „Zertifizierten Wärmepumpen-Anlagenbauer“ in Vorbereitung. Dank den gemeinsamen Anstrengungen der erwähnten Institutionen wurden in der Schweiz im Jahr 2000 über ein Drittel aller Neubauten mit Wärmepumpen ausgerüstet und total über 7000 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 auch im Jahr 2000 vorwiegend durch **bilaterale Kooperation** mit Nachbarländern und durch Mitarbeit bei Projekten der *Internationalen Energieagentur IEA*. Zwischen der *FWS* und den entsprechenden Organisationen in Deutschland und Österreich finden regelmässige Dreiländertreffen statt. Auch die *Electricité de France EdF* ist an unserer Wärmepumpentechnologie interessiert. Die *FWS* ist der *European Heat Pump Association EHPA* als assoziiertes Mitglied beigetreten. Die Schweiz wirkt auch in für die Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnik wichtigen **internationalen Normengremien** mit und bringt dort ihre Erfahrungen bei der Herstellung und Prüfung von Wärmepumpen ein [2].

Im Rahmen der schweizerischen Beteiligung am *IEA Heat Pump Programme HPP* sind wir mit dem Vorhaben [1] am IEA-Projekt *Selected Issues on CO₂ as a Working Fluid in Compression Systems* (Annex 27) beteiligt. Die Schweiz hat auch aktiv an der Reorganisation des *IEA Heat Pump Centre* mitgewirkt (Annex 16). Nebst diesen IEA-Aktivitäten sicherte das BFE die Mitgliedschaft der Schweiz an dem für die Forschung und Entwicklung in der Wärmepumpen- und Kältetechnik wichtigen *International Institute of Refrigeration IIR*. Im Bereich der Abwärmenutzung trat die Schweiz nach der bereits erwähnten Publikation über die *Einführung in die Prozessintegration* [30] infolge zu geringen Interesses der Industrie und schleppender Realisierung neuer Vorhaben aus dem *IEA-Implementing Agreement on Process Integration* aus.

Transfer in die Praxis

Da an den meisten der ohnehin sehr anwendungsnahen Projektarbeiten private Firmen beteiligt sind, ist die **direkte Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft** sehr eng. Die im Jahr 2000 gemeinsam mit Hochschulen und privaten Firmen bearbeiteten Forschungsarbeiten sind **gute Grundlagen für die Entwicklung von Wärmepumpen für den Sanierungsmarkt** und dienen einer **besseren Auslegung** und einem **optimaleren Betrieb** von Wärmepumpenheizungssystemen. Die teilweise gemeinsam mit der chemischen Industrie durchgeführten Arbeiten zur Prozessintegration dienen der **Reduktion des Energiebedarfs komplexer chemischer Batch-Prozesse**. Mit den in der Fachpresse und in der **Internetseite** des Forschungsprogramms publizierten **Kurzfassungen** des Programmleiters [36] wird laufend auf die Resultate abgeschlossener Vorhaben hingewiesen. Entsprechend rege wird die Downloadmöglichkeit für die vollständigen Schlussberichte genutzt. Zahlreiche P+D-Projekte helfen, das in der Forschung erarbeitete Wissen in zuverlässig funktionierende Anlagen umzusetzen. Der Umsetzung der Forschungsergebnisse diente auch die sehr gut besuchte **7. UAW-Tagung des Bundesamts für Energie** vom Mai 00

[31]. Sie zeigte anhand der laufenden Forschungsvorhaben das erhebliche Optimierungspotenzial von Wärmepumpenheizungssystemen auf [32]. Aus den Forschungsprojekten [4], [5] und [12] wurde am Statusseminar des Zentrums für Energie- und Nachhaltigkeit im Bauwesen *ZEN* und aus [12] am Herbstkolloquium des Schweizerischen Vereins für Kältetechnik SVK berichtet.

Das auch vom BFE unterstützte **Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss** leistet einen bedeutenden Beitrag zur Sicherung der Wärmepumpenqualität und zur Erhöhung der Effizienz der im Handel angebotenen Wärmepumpen. Die von der *FWS* organisierte **WP-Expo 2000** mit ergänzenden Workshops in Bern bot erneut eine ausgezeichnete Gelegenheit, einer grossen Besucherzahl die neueste Entwicklung der Wärmepumpentechnik (darunter auch ein Prototyp aus dem Projekt [24]) zu zeigen. Die *FWS* sorgt durch **Ausbildung** der entsprechenden Fachleute, **Beratung**, Verleihung und Weiterentwicklung des **Gütesiegels** sowie Herausgabe diverser **Dokumente** und Formulare für eine Erhöhung der Qualität der Wärmepumpentechnik.

Bewertung 2000 und Ausblick 2001

Die für das Jahr 2000 gesteckten Ziele konnten im Wesentlichen erreicht werden. Allerdings gab es auch dieses Jahr infolge unvorhergesehener Hindernisse einige Verzögerungen in den Terminplänen. Besonders gravierend wirkte sich der Mangel an geeigneten Projektassistenten an Fachhochschulen aus. So musste das Vorhaben [8] nach der Phase 1 auf unbestimmte Zeit unterbrochen werden.

Entsprechend dem **Konzept für die Jahre 2000 bis 2003** [35] dienen die für 2001 geplanten Forschungsarbeiten in erster Linie dem Schliessen von Wissenslücken im Hinblick auf die Entwicklung einer effizienten und kostengünstigen Wärmepumpe für den

Sanierungsmarkt. Ebenfalls hohe Priorität wird der Systemoptimierung beigemessen. Diese umfasst nebst Regelung, hydraulischer Schaltung, Abtaugung, automatischer Betriebsüberwachung und Erfassen des Anfahrverhaltens auch eine gründliche Überarbeitung des BFE-Auslegungsprogramms für Wärmepumpenheizungen *WPCalc* und für Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen *WKKCalc*. Am 8. Mai 2001 wird in Burgdorf die **8. öffentliche UAW-Tagung** mit dem Thema „Neue Wege zur Heizungssanierung mit Wärmepumpen“ durchgeführt. Programm und Anmeldung sind in [36] zu finden.

Projets P+D

Fabrice Rognon, chef du programme P+D

PROGRAMME CHALEUR AMBIANTE (pompes à chaleur)

Suite au coup de frein donné fin 1999, nous avons enregistré et accepté deux demandes nouvelles en 2000. Le mandat de recherche de sites pour l'implantation de pompes à chaleur utilisant la chaleur résiduelle des stations d'épuration des eaux porte ses fruits: 2 projets ont ainsi vu le jour en 2000. Malgré cela, le budget 2000 n'a pas pu être utilisé complètement car

3 gros projets ont malheureusement vu le début des travaux être retardé, entraînant des reports financiers problématiques. Les projets ne sont heureusement pas compromis, mais sont reportés d'une année. Outre 14 mandats, 22 installations se trouvent à des stades divers de réalisation. Une fois achevées, elles totaliseront 5'700kW thermiques et économiseront l'équivalent de 1'300 tonnes de mazout par an. Elles se répartissent de la manière suivante:

Répartition par sources de chaleur

Source de chaleur	Nombre
Air	5
Sondes géothermiques	3
Nappe phréatique	7
Eau de surface (rivière, lac)	2
Eau de STEP	5

Répartition par systèmes principaux

Système	Total	Avec réseau CAD	Avec réseau de source de chaleur
Air/eau monovalent	4	0	0
Air/eau avec appoint	1	1	0
Sol/eau monovalent	3	0	0
Eau/eau avec appoint	14	11	13
Eau/eau avec appoint et combinaison CCF et PAC	2	2	0

CAD: chauffage à distance

CCF: couplage chaleur-force

Répartition par puissance thermique de la PAC et prix de revient de la chaleur

Puissance thermique de la PAC en kW	Total	Prix de revient de la chaleur en ct/kWh après subvention ; mini / maxi
0 à 20	1	21 (projet pilote)
20 à 50	1	38 (sondes géothermiques avec recharge)
50' à 100	5	7 / 40 (dont 1 <i>contracting</i>)
100 à 500	6	9 / 18 (dont 2 <i>contracting</i>)
Plus de 500	5	6 / 15 (dont 4 <i>contracting</i>)

Attention: ces chiffres concernent des installations P+D qui ne sont pas disponibles sur le marché. Cela explique l'ampleur des fourchettes de prix et le niveau des maxima. Le *contracting* se multiplie dans les projets de grande puissances, là où les prix après subvention sont compétitifs. Dans ces cas, notre aide représente environ 25% des surcoûts et 5 à 18% de l'investissement total.

Les rapports suivants sont parus en 2000 et sont disponibles auprès d'ENET :

14166 : Grundwasser-Wärmepumpenanlage Walperswilmatte in Aarberg/BE

12515 : Le Vieux Manoir, Kältemaschinen als Wärmepumpen im Hotelbetrieb

10956 : Centrale termica Morettina Locarno, rapporto d'esercizio

17884 : Oberstufenzentrum Remisberg Kreuzlingen, Qualitätsplanung, Betriebsoptimierung Qualitätsprüfung, Wirtschaftlichkeit

14239 : Grundwasser-Wärmepumpenanlage "Husrüti" in Münsingen, Erfolgskontrolle und Umsetzung

22203 : Grosswärmepumpen, Kostenermittlung und Marktsituation

31544 : Kälte- und Wärmeerzeugung mit Wärmepumpen und Erdwärmesonden im Restaurant Grauholz

Soulignons l'originalité des projets référencés sous 12515 et 31544 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 recherche [12]. Le potentiel d'application dans l'hôtellerie et la restauration est important.

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. La prospection pour des projets dans les STEP sera effectuée dès février 2001 dans le domaine des infrastructures.

PROGRAMME COUPLAGE CHALEUR-FORCE (sans piles à combustible)

Durant l'année écoulée, nous avons enregistré une demande nouvelle qui, vu la complexité et l'ampleur du projet, est encore en discussion. Le mandat de recherche de sites d'implantation dans des STEP d'installations à mini-cogénération (puissance électrique de quelques kW, rendement électrique inférieur à 30%) fonctionnant au biogaz a permis la réalisation de 2 installations en 2000. La prospection pour des projets dans les STEP sera effectuée dès février 2001 dans le domaine des infrastructures.

Outre le mandat susmentionné, 3 des 4 projets en cours fonctionnent au biogaz ou au gaz de STEP. Sauf dans un cas, la chaleur est utilisée. Le rapport suivant est paru en 2000 et est disponible auprès de ENET: Projet OFEN n° 23740 : Cogénération par les groupes de secours, suivi, mesures et transfert du groupe de secours transformé en unité de cogénération aux Transports publics genevois TPG à Bachtet de Pesay.

Afin d'encourager l'utilisation de groupes chaleur-force en combinaison avec des pompes à chaleur, nous avons lancé une étude afin de mettre à la disposition des Cantons un outil de planification de systèmes combinés CCF et PAC. Le rapport paraîtra mi-2001.

Les grandes lignes du programme n'ont pas changé vu la modicité du budget: priorité absolue est donnée aux projets pilotes et aux carburants renouvelables. Lors d'utilisation de combustibles fossiles, le rendement électrique doit être supérieur à 33%.

Liste der Projekte

(JB) Jahresbericht 1999 vorhanden

(ZB) Zwischenbericht vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

Download ab www.waermepumpe.ch/fe Rubrik *Berichte*

- [1] H. Baumann, BAUMANN ENGINEERING, Winterthur: **Ölfreier CO₂-Kleinkompressor** (JB) ENET 0037570, (WWW)
- [2] Th. Afjei, EUTACON, Zürich: **Internationale Zusammenarbeit in Normengremien** (SB) ENET 0036228
- [3] Ch. Dériaz, GEOTECHNIQUE APPLIQUEE DERIAZ SA, Carouge: **Chauffage et climatisation à l'aide de l'air de l'alluvion ancienne dénoyée** (JB) ENET 0037046, (WWW)
- [4] Th. Afjei, FH-Basel & W. Betschart, P. Keller, G. Zweifel, FH-Luzern & H.P. Geering, S. Ginsburg, E. Shafai, IMRT / ETH-Zürich & M.Bonvin, FH-Wallis & D. Wittwer, FWS, Zürich: **Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 3: Test an Funktionsmustern** (SB) ENET 986187 (WWW)
- [5] Th.Afjei, FH-Basel & P.Keller, M.Dürig, G.Zweifel, FH-Luzern & A.Huber, P.Widmer, HUBER ENERGIETECHNIK, Zürich & E.Shafai, IMRT / ETH-Zürich & A.Bühning, FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME, D-79100 Freiburg: **Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 4: Technisches Handbuch** (SB) ENET 9816187
- [6] Th. Afjei, FH-Basel & G. Zweifel, M. Achermann, FH-Luzern & H.R.Gabathuler, GABATHULER AG, Diessenhofen & P.Renaud, PLANAIR, La Sagne & M. Erb, H.P.Eicher, EICHER UND PAULI AG, Liestal: **Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen** (JB) ENET 0039172 (WWW)
- [7] A. Zingerli, M. Ehrbar, FH-Buchs: **Charakteristiken von Vielzellen- und Scrollkompressoren** (ZB, JB) ENET 9934443, (WWW)
- [8] B. Hubacher, M. Ehrbar, FH-Buchs: **Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Phase 1: Analyse gängiger Abtauverfahren** (SB) ENET 0036270, (WWW)
- [9] Th. Kopp, P.Frei, FH-Rapperswil & A. Flück, Th.Schmid, NEK-UMWELTTECHNIK, Zürich & H. Albrecht, KAPAG, Zumikon: **Kleinwärmepumpe mit Ammoniak, Phase 2, Etappe 1: Funktionsmuster** (ZB) ENET 9719746; **Etappe 2: Ölkreislauf und Ammoniakfalle** (JB) ENET 9719746, (WWW)
- [10] G. Zweifel, FH-Luzern & M. Stalder, INGENIEURBÜRO, Hauptikon & E. Shafai, IMRT / ETH-Zürich: **Ausbau der Calc-Programme, Phase 1: Konzept und Gebäudesimulation** (JB) ENET 0038248, (WWW)
- [11] H.R. Gabathuler, H. Mayer, GABATHULER, Diessenhofen & E. Shafai, R. Wimmer, IMRT/ETH-Zürich: **Pulsweitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase 2** (JB) ENET 0038848, (WWW)
- [12] A. Huber, P. Widmer, HUBER ENERGIETECHNIK, Zürich & J. Good, INGENIEURBÜRO VERENUM, , Zürich & D.Trüssel, KWT KÄLTE-WÄRME-TECHNIK AG, Belp & Ch. Schmid, SCHMID ENERGIE-TECHNIK, Winterthur: **Systemauslegung für Gewerbekälteanlagen mit Erdwärmenutzung** (JB) ENET 9933304
- [13] E. Shafai, D. Zogg, , IMRT / ETH-Zürich & M. Ehrbar, L. Wirth, FH-Buchs: **Dynamischer Wärmepumpentest, Phase 1, Dynamischer Wärmepumpentest - Modellansatz für die prüftechnische Charakterisierung der Minderwärmeproduktion** (SB) ENET 9933684
- [14] D. Zogg, E.Shafai, IMRT / ETH-Zürich: **Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen - Phase 5** (JB) ENET 0037129, (WWW)
- [15] Ch. Nellen, K. Boulouchos, Ch. Schaer, Ch. Onder, LVV / ETH-Zürich: **Regelung des SwissMotors für den Einsatz in der Praxis** (SB) ENET 0039708, (WWW)
- [16] P. Krummenacher, D. Favrat LENI / EPF-Lausanne: **Intégration énergétique de procédés discontinus à l'aide d'algorithmes génétiques**, (JB) ENET 0038089 (WWW)
- [17] F.Brand, M.Zehnder, D.Favrat, LENI / EPF-Lausanne & H.U. Bruderer, H. Hohl, SATAG THERMOTECNIK AG, Arbon: **Pompe à chaleur air-eau à haute température, phase 1: solution avec compresseur à injection vapeur** (SB) ENET 9934445 (WWW)
- [18] M.Zehnder, LENI / EPF-Lausanne & H.U. Bruderer, H. Hohl, SATAG THERMOTECNIK AG, Arbon: **Pompe à chaleur air-eau à haute température, phase 2** (JB) ENET 0040071 (WWW)

- [19] M. Zehnder, D. Favrat, LENI / EPF-Lausanne: *Migration d'huile dans les pompes à chaleur* (ZB) ENET 9933683, (WWW)
- [20] Ch. Jahn, K.Hungerbühler LTC / ETH-Zürich: *Lösungsmittelbewirtschaftung in der chemischen Industrie* (ZB), (JB) ENET 9931269 (WWW)
- [21] P. S. Bieler, K. Hungerbühler LTC / ETH-Zürich: *Analyse und Modellierung des Energiebedarfs in Batch-Prozessen* (JB) ENET 0039592 (WWW)
- [22] M. Stalder, INGENIEURBÜRO, *Hauptikon* & A. Huber, HUBER ENERGIETECHNIK, Zürich & S. Albrecht, Albrecht Informatik, Winterthur: *Erweiterung des Programms WPCalc mit dem Erdwärmesondenmodul EWS* (JB) ENET 0039710, (WWW)
- [23] D. Trüssel, KÄLTE-WÄRME-TECHNIK, *Belp* & E. Zahnd, J. Cizmar, FH-Burgdorf & M.Zehnder, D. Favrat, LENI / EPF-Lausanne: *Wärmepumpe mit Zwischeneinspritzung bei Scrollkompressoren* (SB) ENET 9931783, (WWW)
- [24] D. Trüssel, KÄLTE-WÄRME-TECHNIK, *Belp* & E. Zahnd, J. Cizmar, FH-Burgdorf: *Feldmessung einer Retrofit Wärmepumpe* (JB) ENET 0039773 (WWW)

Referenzen

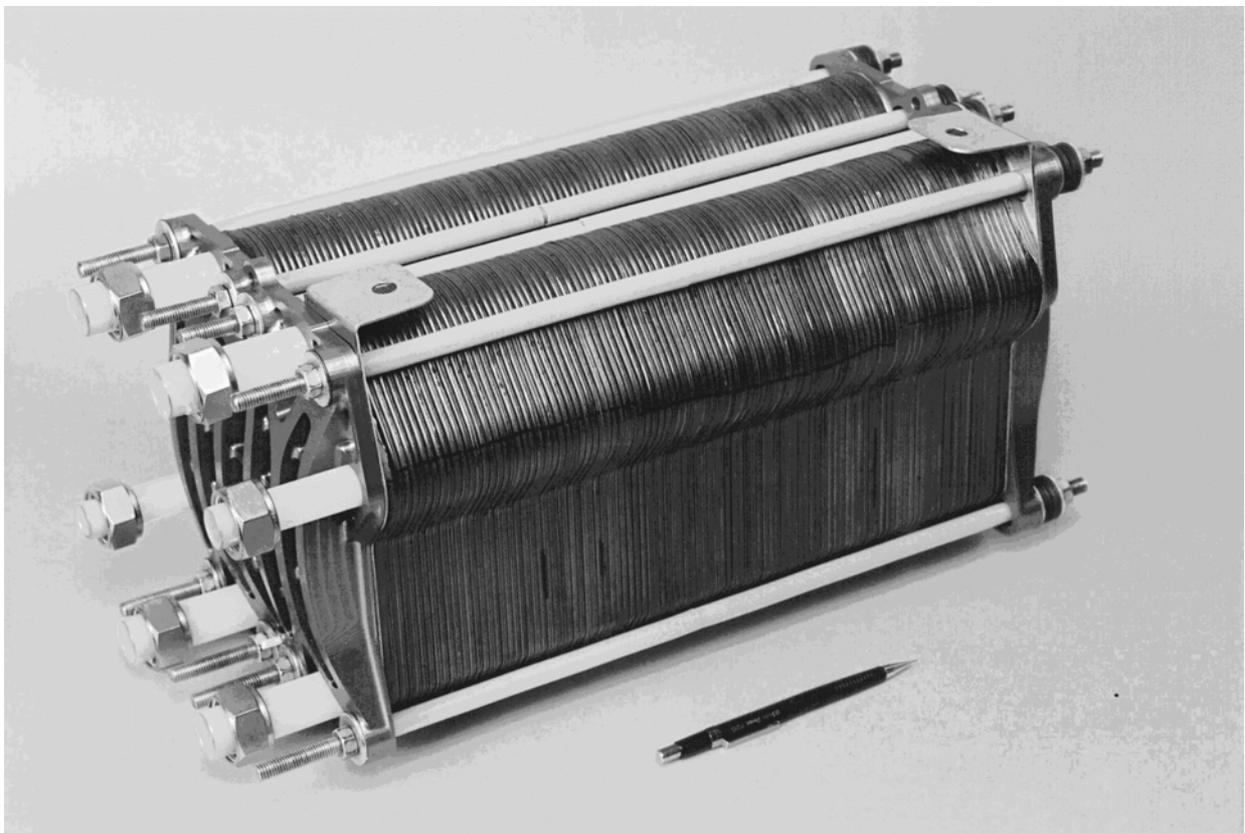
- [25] Th. Afjei: *Kostengünstige Wärmepumpenheizung für Niedrigenergiehäuser*, Bulletin SEV/VSE 91(2000)24, 11/14; tec21 1(2000)47, 17/20.
- [26] Th. Afjei, A.Huber: *Handbuch für kostengünstige Niedrigenergie- und Passivhäuser*, Tagungshandbuch 11. Schweizerisches Status-Seminar 2000, EMPA ZEN, 203/211.
- [27] R. Frischknecht: *Life Cycle Assessment for commercial refrigeration systems operated in Switzerland*. Preprints HeISIE Symposium on Industrial Ecology and Material Flows, 30.Aug.-3.Sept.00.
- [28] J. Good: *Kälte und Wärme aus einem System*, Gebäudetechnik 2(2000)3, 20/22.
- [29] A.Huber, P.Widmer: *Dimensionierung erdgekoppelter Kälte- und Wärmeerzeugungsanlagen mit dem Programm EWS*, Tagungshandbuch 11. Schweizerisches Status-Seminar 2000, EMPA ZEN, 179/184.
- [30] T. Gundersen: *A Process Integration Primer*. IEA Implementing Agreement on Process Integration, Trondheim 2000, ENET 9554740/4, *Download ab [36]*.
- [31] M. Zogg (Hrsg.): *Effizientere Wärmepumpenheizungen durch Optimieren des Gesamtsystems*, Tagungsband zur 7.UAW-Tagung vom 9.Mai 2000, Bundesamt für Energie 2000, *Download aller Beiträge ab [36]*.
- [32] M. Zogg: *Effizientere Wärmepumpenheizungen*, Heizung Klima 27(2000)3, 152/154,157/158; Bulletin SEV/VSE 91(2000)24, 15/19; *Download ab [36]*.
- [33] M. Zogg: *Niedertemperaturwärme aus Erdgas - Ökobilanz für effiziente Systeme*, Gas, Wasser, Abwasser 80(2000)2, 124/127; *Download ab [36]*.
- [34] M.Zogg: *Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel in Wärmepumpen*, KI Luft- und Kältetechnik 36(2000)4, 177/181; *Download ab [36]*.
- [35] M. Zogg, F. Rognon: *Konzept 2000/2003 für das F+E und das P+D-Programm im Bereich Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung*, Bundesamt für Energie 1999; M. Zogg: *Umgebungswärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung*, Schweizer Ingenieur und Architekt, 117(99)47, 14/16; *Swiss research projects on heat pumps*, European Heat Pump News, 1(99)3, 5/8.
- [36] *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.

BRENNSTOFFZELLEN

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 2000

Martin Rüeeggesser / Alphons Hintermann

martin.rueeggesser@bfe.admin.ch / alphons.hintermann@bfe.admin.ch



6.5 kW-Zellenstapel, entwickelt am PSI in Zusammenarbeit mit der ETH-Zürich

Bei diesem Zellenstapel steht ein kostengünstiges Fertigungsverfahren und eine hohe Leistungsdichte im Vordergrund. Beim abgebildeten Zellenstapel wurde ein Leistungsgewicht von 3 kg/kW erreicht.

Programmschwerpunkte

Im Berichtsjahr wurde am Bundesamt für Energie (BFE) das vorher von Herrn L. Dubal geleitete Programm **Brennstoffzellen** in zwei Teilprogramme aufgeteilt und zwei Programmleitern unterstellt:

- Das **Erdgas- und „Biofuel“-Brennstoffzellen** Programm wird von M. Rüeegg (BFE) und
- das **Wasserstoff- und Methanol-Brennstoffzellen** Programm von A. Hintermann (BFE) geleitet.

Die gemeinsamen Programmschwerpunkte sind:

- Das Brennstoffzellen Know-How in der Schweiz sichern und vertiefen und dabei die Produktionsprozesse optimieren und die Produktionskosten verringern.
- Vermehrtes Umsetzen der Resultate aus der langjährigen Forschung durch Unterstützen und Realisieren von P+D-Anlagen: Das Sammeln von Praxiserfahrungen mit Brennstoffzellenanlagen und Vergleiche mit herkömmlichen Lösungen ergeben wiederum neue Impulse für die Forschung und Entwicklung.
- Das Prüfen der Markttauglichkeit der Schweizer Brennstoffzellen zusammen mit einem starken Industriepartner, der gewillt ist, ein Produkt mit ei-

ner Brennstoffzelle im Markt einzuführen und mit den Forschern, den Fachhochschulen (FH) und verschiedenen Zulieferindustrien zusammenzuarbeiten.

Programmschwerpunkte bei den **Erdgas-Brennstoffzellen** sind die Fortsetzung der seit 1991 laufenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Zusammenhang mit der Sulzer HEXIS Solid-Oxide-Brennstoffzelle (SOFC). Nach erfolgreichen ersten Feldversuchen (1994-96) standen in den Jahren 1997 – 2000 Feldtestsysteme als wichtiger Bestandteil für die künftige Markteinführung im Vordergrund.

Das Paul Scherrer Institut (PSI) hat seit 1988 über 100 Mannjahre in die Forschung von PEM-Brennstoffzellen investiert. Im neu geschaffenen BFE-Programm **Wasserstoff/Methanol-Brennstoffzellen** wurden die langjährigen Aktivitäten des PSI neu durch zusätzliche BFE-Mittel verstärkt. Zielsetzung ist, diesen Forschungsschwerpunkt längerfristig zu sichern. Schwerpunkte der vom BFE unterstützten neuen Projekte sind einerseits die industrielle Fertigung der PSI PEM-Brennstoffzelle und andererseits die Demonstration der Tauglichkeit dieser Zelle in einem alltagstauglichen Fahrzeug in enger Zusammenarbeit mit einem europäischen Automobilhersteller.

Anvisierte Ziele 2000

Im Berichtsjahr wurden die Schwerpunkte für die Forschung und deren Umsetzung gemäss dem Konzept der Energieforschung des Bundes 2000-2003 verfolgt. Eine Vertiefung der Kontakte mit den Fachhochschulen wurde in beiden Teilprogrammen angestrebt und auch realisiert.

Im Programm **Erdgas- und „Biofuel“-Brennstoffzellen** waren die Ziele:

- Erste Resultate für ein neues „Anode supported PEN“ Design für SOFC-Brennstoffzellen.
- Erste Konzepte für SOFC-Brennstoffzellen mit CO₂-neutralen Brennstoffen wie Biogas oder Klärgas evaluieren.
- Zertifizierung einer Brennstoffzelle im Einsatzbereich Haustechnik nach EU-Standard.

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

- Start des Projekts PEM-Brennstoffzellen am PSI mit Wasserstoff (H₂) oder Methanol als Brennstoff
- Unterstützung der Demonstration dieser Zellentechnologie in einem Familienauto (Start BRESA-Projekt).
- Verstärkung der Zusammenarbeit des PSI auf dem Gebiet PEM-Brennstoffzellen und der Umsetzung dieser Technologie mit verschiedenen Fachhochschulen (Grenchen, Yverdon, Biel).
- Realisierung eines Brennstoffzellenprüfstandes an der FH-Biel.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

ERDGAS UND BIOFUEL BRENNSTOFFZELLEN

a) SOFC-Grundlagenforschung

Anode Supported PEN for SOFC [1]: Das Konsortium der Partner EMPA, ETH-Zürich, ETH-Lausanne

und Sulzer Innotec erarbeitet eine neue SOFC-Zellentechnologie 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

(Abb.1) die Produktionsprozesse zu optimieren und die Produktionskosten für die Stapelherstellung zu verringern. Die Brauchbarkeit des neuen Zellendesigns mit ersten Testzellen von 35 mm Durchmesser wurde nachgewiesen. Zellen mit 160 mm Durchmesser sind in Bearbeitung und sollen im kommenden Jahr getestet werden. Nach Vorliegen der Testergebnisse wird über den weiteren Verlauf des Projekts entschieden.

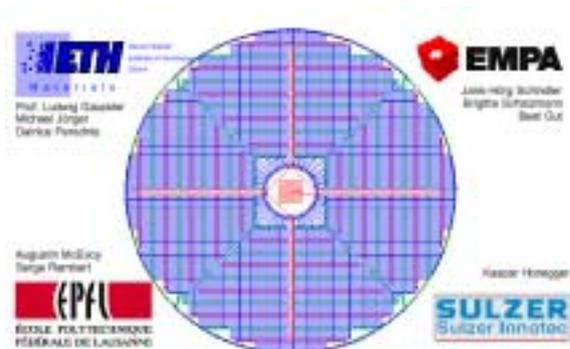


Abb.1: Tannenbaum Zellendesign für die Zuführung des gasförmigen Treibstoffs; eine Entwicklung von EMPA, SULZER Innotec, ETH-Lausanne und ETH-Zürich.

b) P+D Projekte

Pilot-Anlage Biogas - HEXIS [3]: Biogas dient als Brennstoff für eine 1 kW SOFC HEXIS-Vorseriebrennstoffzelle. Ein HEXIS-Brennstoffzellensystem mit einer elektrischen Leistung von 1 kW soll auf der Biogasanlage CHABLOZ in Lully (VD) installiert und als Feldtestsystem betrieben werden (Abb. 2). Vorversuche zur Brennstoffaufbereitung (Reformierung) und zum elektrochemischen Verhalten der Brennstoffzelle mit synthetischem Biogas laufen zur Zeit im Labor.



Abb.2: Biogasanlage mit 4 Fermentern am Landwirtschaftsbetrieb CHABLOZ.

Alle Versuche zeigen bis jetzt, dass der relativ grosse Anteil von Kohlendioxid im Biogas (30-50 Vol%) keine negativen Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit der Brennstoffzellen und des Reformers hat und dass auch die Leistungsdaten nur geringfügig beeinträchtigt sind. Weitere Vorversuche auf Systemebene müssen diese Ergebnisse noch bestätigen. Bis Mitte 2001 soll das komplette System im HEXIS-

Labor aufgebaut und einem Testlauf unterzogen werden. Die Installation und Inbetriebnahme des Systems auf der Biogasanlage ist für August/September 2001 geplant. Anschliessend soll eine ca. 1-jährige Demonstrations- und Betriebsphase folgen. In diesem Versuch soll die Zelle mit Biogas gefahren werden. Die Erfahrungen sollen generell das Machbarkeitspotential, aber auch Vergleiche mit andern Zelltypen und die mittelfristig zu erwartende Wirtschaftlichkeit aufzeigen [10].

Demonstrationsanlage PAFC 200kW_e Brennstoffzelle in Birsfelden [4]: Eine grössere Nahwärmeverbundanlage der AEB Birsfelden AG wurde mit einer Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC) vom Typ PC 25C des Herstellers ONSI Corp., Connecticut (USA) als Grundlasteinheit ergänzt (Abb.3). Die Brennstoffzelle wurde termingerecht am 16. März 2000 in Birsfelden angeliefert. Nach Fertigstellung der peripheren Anlagekomponenten, wurde die Brennstoffzelle am 1. August 2000 in Betrieb genommen und nach einem 72-Stunden Probetrieb am 5. August 2000 den lokalen Verantwortlichen übergeben. Nach einigen (nicht Brennstoffzellen bedingten) Betriebsausfällen lagen Ende November 2000 noch keine detaillierten Betriebsauswertungen vor.



Abb. 3: PC 25C Brennstoffzelle als Kompaktanlage für Aussenauftellung in Birsfelden

Als Hauptnachteile in der Projektrealisierung erwiesen sich die fehlenden direkten Kontakte zum Hersteller (ONSI) und dessen mangelnde Flexibilität bei der Berücksichtigung von Kundenwünschen. Positiv bewertet wurde hingegen, dass die elektrische und die thermische Leistung sowie ein definierter Wirkungsgrad seitens des Herstellers gewährleistet werden.

Zertifizierung einer HEXIS-Brennstoffzelle nach EN-Standard [5]. Die Anforderungen für die Zulassung von Brennstoffzellensystemen in der Haustechnik wurden für den Raum Deutschland ab Mitte 1999 erarbeitet. Grundlage für die Aktivitäten des DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches) bildete der Entscheid des GADAC (Gas Appliance Directive Advisory Committee), dass sog. „Brennstoffzellenheizgeräte“ als Gasgeräte im Sinne der EG-Gasgeräte-Richtlinie zu betrachten sind. Sulzer Hexis AG war neben Hamburg Gas Consulting und Vaillant

GmbH einer von drei Herstellern, die in die Arbeit des Arbeitskreises Brennstoffzellen des DVGW integriert waren. Resultat der Arbeiten ist die Vorläufige Prüfgrundlage (VP) 119 „Brennstoffzellen-Gasgeräte bis 70kW“ 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.

WASSERSTOFF UND METHANOL PEM-BRENNSTOFFZELLEN

a) PEM-Grundlagenforschung

Ein Teil der PEM-Grundlagenforschung am PSI war schon im früheren BFE-Projekt "Material- und Strukturaspekte von Polymerelektrolyt Brennstoffzellen" unterstützt worden und hatte zu zwei Dissertationen geführt. Diese Arbeiten sind im Berichtsjahr mit dem neuen Projekt **Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H₂ oder Methanol als Brennstoff** [2] verstärkt worden. Ein Projektschwerpunkt liegt im Bereich des atomaren/molekularen Verständnisses der in Brennstoffzellen ablaufenden Reaktionen.



Abb. 4 Mobiler Teststand für Direkt-Methanol-Brennstoffzellen

Dazu wird ein Modellsystem einer mikrostrukturierten Elektrode und eines polymeren Festelektrolyten untersucht. U.a. sollen damit auch Aufschlüsse über die Ausnützung des Edelmetalls Platin an der Phasengrenze zum Festelektrolyten gewonnen werden.

Elektrochemische Abklärungen widmen sich der Suche nach verbesserten Elektrokatalysatoren für die O₂-Reduktion. Der C-geträgerte PtCo₃ Katalysator weist dafür eine bessere Aktivität als reines Platin auf. Mit kommerziellen C-geträgerten Katalysatoren konnten Aktivschichten für Brennstoffzellen präpariert werden, die bezogen auf die Masse des Platins eine höhere Aktivität aufweisen. Solche Schichten bieten die Möglichkeit, die Platinbeladung der herkömmlichen Aktivschichten zu reduzieren. Mit einer automatischen Beschichtungsmethode für grössere Flächen sollen diese Schichten weiter optimiert werden. Durch Variation der Synthesebedingungen konnte eine deutliche Verbesserung der Membraneigenschaften erzielt werden. Spezifische Leistungen von 0.5 W/cm² bei 0.5 V und eine Lebensdauer von ca. 2500 Stunden konnten nachgewiesen werden.

Mit dem mobilen Teststand (Abb. 4) konnten mit der Neutronenradiografieanlage NEUTRA an der SINQ des PSI zum ersten Mal *in situ* Abbildungen des Massenflusses auf der Anodenseite von flüssiggespeisten Direkt-Methanol-Brennstoffzellen während des Betriebes gemacht werden (Abb. 5).

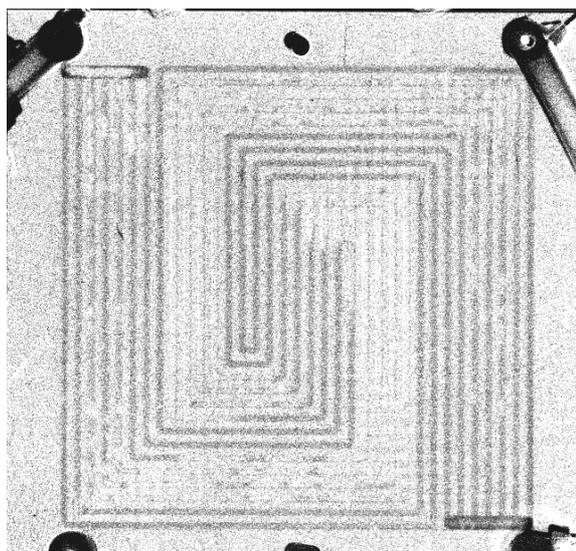


Abb. 5 Zweiphasenfluss von H₂O+MeOH/CO₂ im Flussfeld während des Betriebs der Brennstoffzelle

Diese Methode erlaubt, die Zweiphasenströmung bildgestützt zu untersuchen und damit den Massenfluss auf der Anodenseite dieses Brennstoffzellentyps im Hinblick auf die Leistungsabgabe zu optimieren. In Zukunft können nun Messungen zur Optimierung der Konstruktion des Flussfeldes in Abhängigkeit der Betriebsparameter der Zelle durchgeführt werden.

b) PEM Anwendungen

In der Weiterführung des Projekts **Small PEFC Power Pack Family** [6] befasste sich die FH-Grenchen mit den beim praktischen Einsatz von PSI-PEM-Zellen auftauchenden Problemen. Einerseits wurde die Reparatur des PEFC-Moduls 300W der SI Lausanne erfolgreich abgeschlossen. Andererseits wurde

durch Optimieren des Wasserstoffdurchflusses und der Wasserabscheidung sowie das Suchen geeigneter Komponenten der Wirkungsgrad eines PEFC-Moduls verbessert. Für dessen Einsatz im mobilen Sektor ist ein Modul mit stabilisiertem 24V Ausgang viel günstiger. Die Ergänzung des PEFC-Moduls mit einem speziellen DC/DC Wandler und der dazu notwendigen Steuerung wurde in Zusammenarbeit mit der FH beider Basel erfolgreich abgeschlossen. Ebenso wurde in einer Studentenarbeit das 300W PEFC-Modul in einen Rollstuhl eingebaut. Vergleiche mit dem bisherigen Bleiakku-Betrieb des Rollstuhls zeigten, dass der BZ betriebene Rollstuhl wohl eine 3,5 fach erhöhte Reichweite besitzt, die BZ und der H₂-Tank aber auch 3,5 mal mehr Platz beanspruchen als der Bleiakku und aufwendiger sind in der Bedienung.

Im Rahmen des Pilotprojekts **Petite embarcation nue par pile à combustible de 300 W** [7] wurde an der FH Yverdon das Boot Hydroxy 300 als Prototyp mit einer PSI-PEM Brennstoffzelle ausgerüstet und auf dem Neuenburgersee betrieben. Probleme tauchten mit der ersten Zelle des Brennstoffzellen Stapels auf. Der dadurch entstandene Leistungseinbruch ist Gegenstand weiterer Untersuchungen. usammen mit der Bootsbauerfirma *MW-Line* und der FH-Yverdon ist als Folgeprojekt das 6-Personen-Boot Hydroxy 2000 im Gespräch, das in Katamaranbauweise eine

Geschwindigkeit von 10 – 15 km/h aufweisen soll.

Gemeinsam mit dem Programm „Verkehr und Akkumulatoren“ wurde im Berichtsjahr das Projekt **BRE-SA** [8] gestartet. In enger Zusammenarbeit verschiedener Hoch- und Fachhochschulinstitutionen, KMU und einer deutschen Automobilfirma soll ein familien-taugliches Fahrzeug mit einer PSI-PEM-Zelle (siehe Titelbild) und einem Supercap-Zwischenspeicher ausgerüstet werden. Die für einen technisch relevanten Massstab notwendigen Komponenten werden entwickelt, modelliert und evaluiert. Für den Brennstoffzellenstapel wurden neue Materialien und Fertigungsaspekte entwickelt und realisiert. Die Kombination der Leistungen der Brennstoffzelle und der Supercaps mit den Erfordernissen des Elektromotors erfordert eine Leistungselektronik. Zum Abgleich der Leistungen und der verschiedenen Spannungsniveaus wurde eine entsprechende Leistungselektronik entwickelt und gebaut. Für die Realisierung des Gesamtsystems wurde das Steuer- und Regelungssystem entwickelt und hardwareseitig die Architektur und die Komponenten evaluiert und beschafft. Auf der funktionalen Ebene erfolgte die Modellierung der verschiedenen Subsysteme, mit der Zielsetzung, Erkenntnisse für die Reglerauslegung zu erhalten. Die ersten Resultate sind ermutigend, die Realisierung des Gesamtsystems wird jedoch eine Herausforderung an alle Beteiligten sein.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Sowohl in der SOFC- wie in der PEM-Forschungsszene herrscht eine aktive Zusammenarbeit der Hochschulforscher mit Industriepartnern und verschiedenen Fachhochschulen.

Die Industriekontakte – insbesondere mit den KMU – sind noch weiter ausbaufähig, ja unabdingbar, wenn die Industriepartner rechtzeitig auf eine breite Markteinführung der Brennstoffzellentechnologie vorbereitet werden sollen. Anlässlich des Helbling-Abendseminars vom 21. 9.2000 referierte Prof. M. Meier vom Zentrum für Produkteentwicklung der ETH-Zürich zum Thema „**Die Brennstoffzelle – innovative Geschäftsfelder für unsere Unternehmer?**“ Die vor allem aus Industriekreisen stammenden rund 80 Teilnehmer unterstützten die Meinung des Referenten: 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.

Die Aktivitäten im Rahmen des IEA „Advanced Fuel Cell“ Agreement mit dem Annex XIII: *Solid Oxide*

Fuel Cell sind unverändert abgewickelt worden. Ab 2001 wird die Schweiz mit Wahrscheinlichkeit im Annex XII: *Stationary Fuel Cell* und im Annex XV: *Transportation* vertreten sein.

Wiederum haben etliche Schweizer Forscher im Bereich Brennstoffzellen an internationalen Kongressen mit ihren Vorträgen ein beachtliches Echo ausgelöst. Schwerpunkt im Berichtsjahr war sicher das „2000 Fuel Cell Seminar“ in Portland USA. Die Schweiz war durch verschiedene Firmen und Fachleute mit Vorträgen und Postern vertreten: (<http://europa.eu.int/en/comm/dg17/prog5/index.htm>).

Am 10. – 14. Juli fand im Kongresszentrum in Luzern das 4th *European Solid Oxide Fuel Cell Forum* statt. Über 400 Fachleute aus aller Welt liessen sich über den neuesten Stand in Forschung und Entwicklung informieren. Parallel dazu fand eine Ausstellung von Brennstoffzellenherstellern und –anwendern statt, die auf reges Interesse stiess und auch wertvolle Informationen für die Forscher lieferte.

Umsetzung in die Praxis

Der Industriepartner SULZER HEXIS bearbeitet zusammen mit den Hoch- und Fachhochschulen eine Reihe von BFE- und KTI- geförderten Projekten, die in die Gesamtstrategie von SULZER HEXIS integriert sind. Die Visionen von SULZER HEXIS sind:

- HEXIS wird die bevorzugte Marke bei keramischen Brennstoffzellen kleiner Leistung für die Haustechnik von morgen.
- Markteintritt mit einem massengefertigten System.
- Strategische Partnerschaften für den Markteintritt.
- Expansion in neue Märkte mit der HEXIS Kerntechnologie für neue Anwendungen und Brennstoffe.

Im früheren BFE-Projekt "Material- und Struktur Aspekte von Polymerelektrolyt Brennstoffzellen" wurden die Grundlagen für die heute laufenden Industrieprojekte (z.B. Zusammenarbeit mit der Firma VW) gelegt. Die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten werden in einer nächsten Stufe in solche Industrieprojekte einfließen. Für den Schwerpunkt Membranherstellung werden Gespräche mit der Industrie geführt. Die an der Neutronenradiografieanlage durchgeführten Messungen zur Abbildung des Zweiphasenstroms in Direkt Methanol Brennstoffzellen (Anodenseite) sind auch für H₂-Brennstoffzellen (Kathodenseite) interessant. Es besteht Interesse von Industriefirmen, diese Methode für die Optimierung ihrer Zellkonstruktionen anzuwenden.

Die Fachhochschulen werden in Zukunft eine starke Rolle in der Umsetzung der Brennstoffzellentechnologie einnehmen. Ein Brennstoffzellensystem benötigt zu seiner Funktion neben dem Zellenstapel eine Reihe weiterer Hilfskomponenten wie ein Frischluftverdichter und -Befeuchter, Stapelkühlung- und Wär-

meabfuhrsysteme, Elektronik zur Leistungsoptimierung des Gesamtsystems u.a. Hier können die Fachhochschulen ihre Fachkompetenz für Systemfragen und ihr Beziehungsnetz zur Privatwirtschaft einbringen und damit eine wichtige Brückenfunktion beim Transfer des Hochschulwissens in die Praxis übernehmen. Diese Funktion werden sie sowohl für die PEM- als auch für die SOFC-Zellentechnologie in den folgende im Berichtsjahr bewilligten KTI-Projekten übernehmen:

An der Fachhochschule Biel wird in den nächsten zwei Jahren ein dynamischer Teststand für PEM-Brennstoffzellen für mobile und stationäre Anwendungen im Leistungsbereich bis 10 kW aufgebaut. Die Brennstoffzelle wird in der Regel als fertiges Modul angeliefert und die Fachhochschulen beantworten und lösen Systemfragen unter Berücksichtigung der Wünsche der Anwender. Damit können sie dem Zellenhersteller wertvolle Informationen von systemseitig wünschbaren Anforderungen an das Brennstoffzellenmodul wie beispielsweise wie verbraucherseits wünschbare Zellencharakteristiken liefern.

Die Zürcher Hochschule Winterthur (ZHW) unterstützt den Einsatz von SULZER HEXIS-Zellen mit dem Projekt **Aufbereitung von herkömmlichen und biologischen Brennstoffen für Hochtemperaturbrennstoffzellen** [9]. Der Art der Brennstoffaufbereitung für Brennstoffzellen wird in Zukunft grosse Bedeutung zukommen. Mit diesem Projekt wird der systematische Kompetenzaufbau der ZHW auf dem Gebiet der SOFC weiter ausgebaut.

Die FH-Yverdon hat verwertbare Erfahrungen mit der Umsetzung der Brennstoffzellentechnologie in Booten gesammelt.

Bewertung 2000 und Ausblick 2001

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

Die Forschungsaufgaben 2001 sind: Die Membran-Elektroden-Einheiten für H₂/O₂ (Luft) Brennstoffzellen sollen sowohl auf der atomar/molekularen Ebene (Modellsysteme, Grundlagen der Elektrokatalyse) als auch auf der makroskopischen Ebene (Elektroden, Zellen) optimiert werden. Das Verständnis der Umsetzung verbesserter atomar/molekularer Eigenschaften auf makroskopische Systeme (Elektroden) ist von besonderer Wichtigkeit.

Die Verbesserung der Zellgeometrien von Direkt Methanol-Brennstoffzellen, unter Zuhilfenahme der

Neutronenradiografie, soll zu effizienten Verteilerstrukturen auf der Anodenseite der Bipolarplatte führen. Im Anschluss daran ist geplant, die Diffusionschicht der Anode unter Berücksichtigung der Grenzfläche Aktivschicht/Membran zu optimieren. Ziel ist es, für eine flüssiggespeiste Direkt-Methanol-Brennstoffzelle mit technisch relevanter Aktivfläche eine Methode zur Optimierung des Massenflusses der Reaktanden und der Produkte auf der Anodenseite zu entwickeln.

In der SOFC-Grundlagenforschung wird die Elektrochemie, der ESD-Elektrolyt und das Austesten der ersten 120 mm Zellen im Vordergrund stehen.

Die Aufgaben für 2001 in Sachen Umsetzung, Wissenstransfer und Vernetzung sind: Die PSI-Aktivitäten stärker mit FH und KMU vernetzen, resp. diese vermehrt in die PSI-Arbeiten integrieren. Dazu

sollen als Vorbereitung zu einem KTI-Projekt (**PowerPac**) in Zusammenarbeit des PSI mit dem Zentrum für Produkteentwicklung der ETH-Zürich Anfang 2001 zwei Seminare mit Industriebeteiligung organisiert werden. Das Ziel ist, ein Netzwerk von potentiellen Anwendern und Produzenten von Brennstoffzellen resp. Komponenten aufzubauen, um Technologiewissen zu transferieren und ein Brennstoffzellensystem (z. B. PowerPac) als gemeinsame Produkteplattform zu entwickeln.

Ferner steht die Vorstellung des Forschungs- und Umsetzungsprogramms Brennstoffzellen 2000-2003 in der CORE und dazugehörend ein kritisches Sichten und Bewerten der IEA-Beteiligungen im Arbeitsplan. Der Internet Auftritt des Programms Brennstoffzellen wird ebenso von Bedeutung sein wie das vermehrte Publizieren von Artikeln für das breite Publikum (z.B. in den ENET-News).

Liste der Projekte

(JB): Jahresbericht 2000 vorhanden

(SB): Schlussbericht vorhanden

zu beziehen bei: www.energieforschung.ch und www.infoenergie.ch

Weitere Adressen: www.energie-schweiz.ch , www.energy-research.ch

- [1] B. Gut et al., EMPA-Dübendorf, A. McEvoy et al: EPF-Lausanne, L. Gauckler et al.: ETH-Zürich: **Konsortium "Anode supported PEN for SOFC"** (JB)
- [2] G. Scherer et. al, PSI-Villigen, **Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H₂ oder Methanol als Brennstoff** (JB)

Liste der P+D-Projekte

- [3] A. Schuler, SULZER HEXIS AG Winterthur, Y. Membrez EREP SA Aclens, J. Vanherle EPF-Lausanne: **Pilot-Anlage Biogas - HEXIS** (JB)
- [4] S. Renz, THOMA+RENZ Basel: **Nahwärmeversorgung mit Brennstoffzelle Typ ONSI PC 25C in Birsfelden** (JB)
- [5] M. Keller, SULZER HEXIS AG Winterthur: **Zertifizierung einer Brennstoffzelle nach EN-Standard** (JB)
- [6] I. Popelis, FH-Grenchen, **Small PEFC Power Pack Family** (SB)
- [7] J.-F. Affolter, FH-Yverdon **Petite embarcation mue par pile à combustible de 300 W** (SB)
- [8] P. Dietrich et. al., PSI-Villigen: **Personenwagen mit Brennstoffzellen- und Supercap-Antrieb – ein Beitrag Richtung nachhaltiger Mobilität, demonstriert in einem Familienauto** (JB)
- [9] T. Spielmann, Zürcher Hochschule, Winterthur: **Aufbereitung von herkömmlichen und biologischen Brennstoffen für Hochtemperaturbrennstoffzellen**

Referenzen

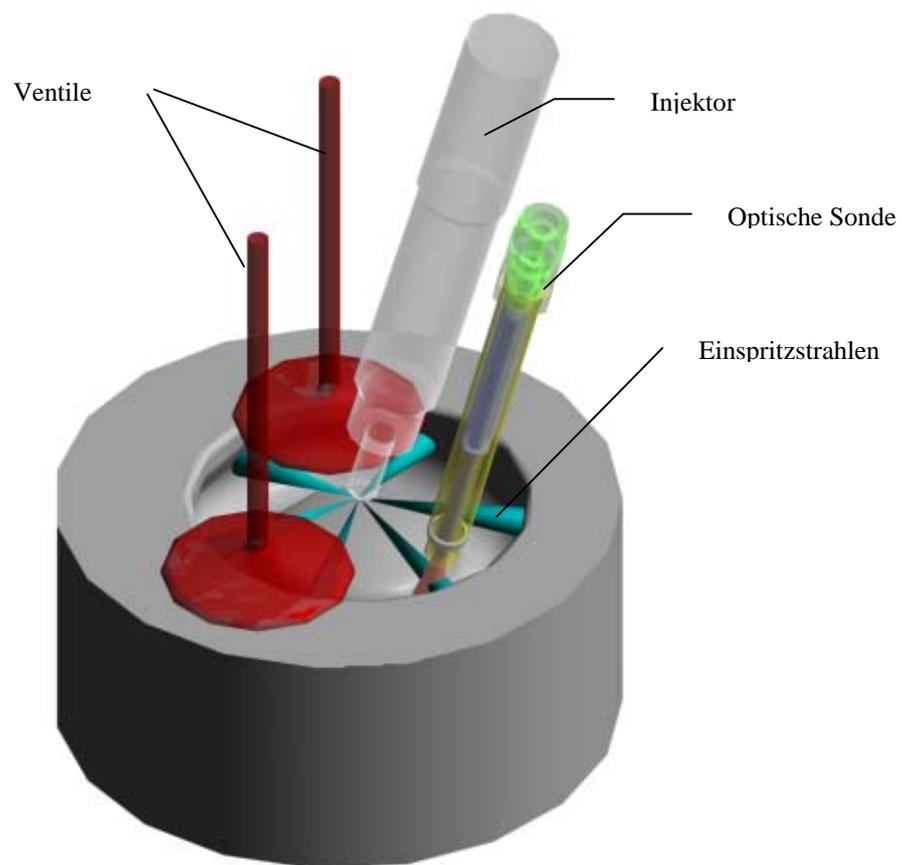
- [10] H. Raak: **Die 1-kW-SOFC-Brennstoffzelle zur Strom- und Wärmeerzeugung im Haushalt**, aus *gwf – Gas Erdgas*, 141, Heft 10, Seiten 716 – 720, 2000.
- [11] P. Dietrich, PSI-Villigen, G.G. Scherer: **Brennstoffzellenantriebe – Die Alternative für die Zukunft?**, NZZ-Artikel für die Extrabeilage zum Autosalon 2000 in Genf

FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 2000

Alphons Hintermann

alphons.hintermann@bfe.admin.ch



Neues Messsystem zur effizienten Motorensteuerung

Das am Laboratorium für Verbrennungsmotoren und Verbrennungstechnik der ETH-Zürich entwickelte Mehrfarbenendoskopiesystem soll in Zusammenarbeit mit der Firma Kistler Instrumente AG, Winterthur, in ein marktfähiges Sensorprodukt zur Charakterisierung der motorischen Verbrennung umgesetzt werden.

Programmübersicht und anvisierte Ziele

Im Programm *Feuerung und Verbrennung* [28] werden seit 1988 die **Grundlagen der Verbrennungsprozesse** stationärer atmosphärischer Feuerungen (inkl. Abfallverbrennungsanlagen), Gasturbinen sowie der motorischen Verbrennung erforscht und gefördert. Bei der Weiterentwicklung technischer Verbrennungssysteme ist man häufig am Ende der mit der traditionellen "Trial and Error"-Methode erreichbaren Effizienz angelangt. Numerische Simulationsmethoden, validiert mit traditionellen und neuen Messmethoden, sind moderne Hilfsmittel für den Konstrukteur, um die Anzahl der Konstruktionsmuster drastisch zu reduzieren und Zeit und Geld zu sparen. Die Entwicklung praxistauglicher Rechencodes steht daher im Vordergrund.

Programmzielsetzungen sind eine international anerkannte Fachkompetenz an den geförderten Institutionen, die Vernetzung der vorhandenen Kompetenzen, die Einbindung der Fachhochschulen durch gemeinsame Projekte sowie die konsequente Umsetzung der Forschungsergebnisse in der Privatwirtschaft. Mit der Sicherung der Kontinuität in der Forschung leistet das Programm die **wichtige Brückenfunktion** zwischen der langfristigen Hochschulforschung (Zeithorizont zehn Jahre) und der Industrieforschung (Zeithorizont ein bis zwei Jahre), indem gemeinsame Projekte unterstützt werden, die erst in fünf Jahren oder noch später zu industriellen Produkten führen. Projekte mit kürzeren Umsetzungshorizonten werden auch mit Mitteln der KTI- resp. des Forschungsfonds der Erdölvereinigung abgedeckt.

Das Fachwissen ist an der ETH-Zürich im Laboratorium für Verbrennungstechnik und Verbrennungsmotoren (LVV: <http://www.lvv.ethz.ch/>), und im Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTNT: <http://www.lntn.ethz.ch/>) sowie am PSI (<http://www.psi.ch/crl>) konzentriert. Forschungsschwerpunkte sind **Numerische Simulation** auf der theoretischen und **Optische Messmethoden** auf der experimentellen Seite. Beide Schwerpunkte sind einem raschen Technologiewandel unterworfen und stellen daher die Forscher vor immer neue Herausforderungen. Ein weiterer Schwerpunkt bildet die **Schadstoffreduktion und Schadstoffanalytik**. Aufgrund der erarbeiteten Erkenntnisse betreffend der Schadstoffbildungsmechanismen während der Verbrennung sind wir heute in der Lage, massgebend zur Entwicklung zukunftsweisender schadstoffarmer Verbrennungssysteme [12, 16-20, 23, 36-38] beizutragen. In diesen Systemen soll die Verbrennung so stattfinden, dass – neben optimaler Leistung – die erzeugten Schadstoffe möglichst durch verbrennungstechnische Massnahmen und höchstens einer Abgasnachbehandlung die Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung (LRV) unterbieten, resp. eine europaweite Verschärfung ermöglichen.

Erfolge zu verbreiten und **mit neuen, marktfähigen Produkten aufzuwarten**, ist das Hauptziel der P+D-Aktivitäten, die vernetzt zwischen den Hochschul- und den Industriepartnern definiert und realisiert werden. 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-Motoren (Fig. 1) auf Leistungs-



Fig. 1: Einzylinder-LIEBHERR Dieselmotor mit Abgasrückführung Prüfstand am LVV der ETH-Zürich.

erhöhung und Erfüllung der zukünftigen EURO-III- und EURO-IV-Emissionsnormen getrimmt. Die Einführung dieser neuen Technologie in die Serie ist für die Motorenherstellung der Firma LIEBHERR, *Bulle* überlebenswichtig 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 kürzlich die Wärsilä 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.

Ausserdem wurde in der katalytischen Verbrennung am PSI der Sprung von den Grundlagen zur Anwendung geschafft durch ein neues Projekt mit dem Gasturbinenhersteller Alstom Power, *Baden*.

Die 1999 am LVV erzielten Weltrekorde [19] beim LIEBHERR-Gasmotor werden nun in Zusammenarbeit des LVV mit der Firma DIMAG im Feldtest an einer DIMAG Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlage (WKK) auf ihre Praxisrelevanz geprüft. Falls sich die

aufgrund der Laborwerte erhofften Verbesserungen betreffend Wirkungsgrad und Emissionen im Langzeitest bestätigen, werden neue Massstäbe bei gasbetriebenen WKK-Anlagen gesetzt, die eine Absenkung der heutigen Abgasnormen erlauben.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

GRUNDLAGEN DER VERBRENNUNG

Die Evaluation des Potenzials und der 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 Motorenkammern** [1] untersucht. Für einen Gegenstrombrenner mit Wasserstoff als Brennstoff unter Einbezug unterschiedlicher Randbedingungen konnte gezeigt werden, dass die *edge-flame* einer neuen, vierten numerischen Lösung des Problems entspricht. Diese neue Erkenntnis ist von grosser Bedeutung für das Verständnis dieser komplexen Flammenstruktur und wurde in zwei Beiträgen für das *28th Int. Symposium on Combustion (Edinburgh, Juli 2000)* vorgestellt. Zur Zeit wird die Anwendung der DNS auf Methan als Brennstoff ausgedehnt. Als nächster Schritt ist die Erweiterung des 2-D Codes auf einen voll 3-D, parallelisierbaren Algorithmus in Angriff genommen worden. Dazu konnten das CSCS in Manno und das *Argonne National Laboratory* in den USA als Partner gewonnen werden.

Bei der **Tieftemperaturverbrennung bei hohen Drücken** [2] steht die Anwendbarkeit von verschiedenen hetero/homogenen Reaktionsmechanismen im Vordergrund. In laminaren Strömungen in der katalytisch stabilisierten Verbrennung von H₂/Luft Gemischen werden über Platin beschichtete Oberflächen numerisch und experimentell untersucht. Ein geeigneter hetero/homogener Reaktionsmechanismus wurde in die Turbulenzstudien eingebaut. Der Vergleich zwischen Simulation mit dem neu implementierten *Low Reynolds Number* Turbulenz Modell und den Experimenten ist sehr ermutigend. Zur Zeit werden Experimente unter Hochdruckbedingungen (bis zu 5 bar) mit H₂/Luft Gemischen durchgeführt und eröffnen ein neues Gebiet für kombinierte experimentell-numerischen Studien. Die Ergebnisse der Experimente werden ab dem nächsten Jahr in eine Zusammenarbeit mit Alstom Power in eine künftige industrielle Anwendung einfließen.

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. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf die spezifischen Bedingungen einer Brennkammer für stationäre Gasturbinen ist von zentraler Bedeutung im Projekt. Da in

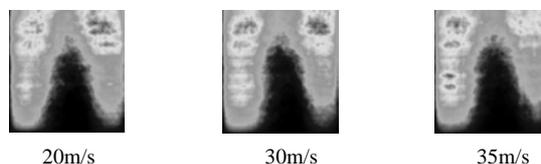
der Literatur kaum experimentelle Ergebnisse bei gasturbinentypischen Betriebsbedingungen (hohe Temperaturen, mageres Gemisch, hoher Druck) zu finden sind, wurden Berechnungen bei Variation der Parameter Druck, Temperatur und Luftzahl durchgeführt. Mit Hilfe dieser Rechnungen wurde eine Datenbasis geschaffen, mit der die turbulenten Vormischflammen der geplanten Hochdruckexperimente klassifiziert werden können.

Beide Projekte [2,3] profitieren von der intensiven Zusammenarbeit zwischen dem LVV und der PSI-Gruppe Verbrennungsdiagnostik. So wurden am



Fig. 2 : Hochdruck-Brennkammer mit Abgassystem für die Untersuchung turbulenter Vormischflammen

gemittelte Aufnahmen (2x256 Einzelbilder):



Einzelchuss Aufnahmen:

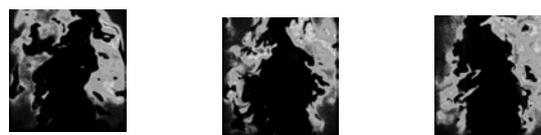


Fig 3: OH-LIF Messungen bei drei verschiedenen Geschwindigkeiten (20 m/s, 30 m/s und 35 m/s), einer Vorwärmtemperatur von 623 K und einer Luftzahl von 1.95.

PSI-Hochdruckverbrennungsprüfstand die experimentellen qualitativen Messungen der OH Radikal Verteilung mittels Laser-induzierter-Fluoreszenz (LIF) (Fig. 2) mit theoretischen Ergebnissen im Projekt [3] verglichen (Fig. 3).

Mit den nun voll operativen Hochtemperaturdruckzellen am LVV und am PSI steht in 2-facher Ausführung ein Versuchsträger für die Untersuchung der Verbrennung und Schadstoffbildung von zweiphasigen, instationären Strömungen mit chemischen Reaktionen dem Projektverbund **Dieselmotorische Gemischaufbereitung** zur Verfügung und ermöglicht Forschungsarbeiten an weltweit vorderster Front. Die erreichten Betriebsparameter (knapp 100 bar Druck und eine Temperatur von ca. 900 K vor Start des Zyklus) sind im internationalen Vergleich Spitzenwerte.

OPTISCHE MESSMETHODEN

Beimischung von 10 - 20% von Azetalen im Treibstoff bewirken eine **wesentliche Reduktion des Russausstosses von Dieselfahrzeugen**. Im Vorhaben **Thermochemische Charakterisierung und spektroskopischer Nachweis von Sauerstoffverbindungen im Zusammenhang mit der Verbrennung sauerstoffhaltiger Brennstoffe** [4] sind Azetale wie Methylal und Buthylal als Brennstoffzusätze für die dieselmotorische Verbrennung in Untersuchung. Massenspektrometrische Analysen von Azetalen ergaben wichtige Hinweise auf die Mechanismen der pyrolytischen Fragmentierung. Infolge Instabilität gewisser Azetal-Ionen, gestalteten sich die Experimente im Molekularstrahl wesentlich schwieriger als erwartet. Quantitative Ergebnisse können deshalb nur mit zusätzlichen und alternativen Messungen erarbeitet werden. Die nano- und femtosekunden Messmethoden [41] konnten mit Erfolg weiterentwickelt werden. Eine femtosekunden N2-CARS Messung in einer Flamme ergab neben der Temperatur auch genaue molekulare Daten. Ein spezielle Methode, *Two-Colour Four Wave Mixing* [42], erlaubte die Untersuchung von Stossrelaxationen von Molekülen im elektronischen Grundzustand. Beide Methoden zeichnen sich durch einen sehr hohen Signal-zu-Rauschen- Abstand aus, was eine exakte spektroskopische Auswertung ermöglicht.

Im Hinblick auf eine erfolgreiche Einführung alternativer und synthetischer Brennstoffe befasst sich dieselbe Forschergruppe im neu gestarteten Projekt **Verbrennungsreaktionen in Gegenwart sauerstoffhaltiger Brennstoffe** [5] mit den bisher weitgehend unbekannt Daten zur Verbrennungschemie von Methylal und Butylal. Die erarbeiteten Grundlagen werden nicht nur zur optimalen Verbrennung sondern auch zu effizienten Synthese dieser Stoffe aus Biomasse nützlich sein.

In den letzten Jahren hat die wachsende Besorgnis der Bevölkerung um die gesundheitlichen Auswirkungen der Partikelemissionen aus Verbrennungsvorgängen

die Erforschung neuer Messverfahren beschleunigt. Sowohl die traditionelle Technik von LIF als auch die neue zeit-aufgelöste Technik der laserinduzierten Gitter (LIG) wurden im Projekt **Laserspektroskopische Methoden zur Analyse von Flammen und Brennstoff-sprays** [6] weiter verfeinert und für Drücke bis 25 bar erfolgreich eingesetzt. Dabei konnte durch die Fluoreszenz des heißen und noch nicht verbrannten Sauerstoffs die Struktur der Flamme bei fetter Verbrennung mit LIF sichtbar gemacht werden. Die Experimente bei magerer Verbrennung zeigen im Unterschied dazu generell heiße Zonen mit einem Überschuss an O₂. Die LIG-Experimente ermöglichten simultane Messungen der lokalen Temperatur und Strömungsgeschwindigkeiten von Gasen.

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 der Effizienz bei der Brennstoffausnutzung als auch der Schadstoffreduktion bei der praktischen Auslegung von Anlagen möglich. Für einen sinnvollen Einsatz der entwickelten numerischen Werkzeuge ist die Validierung durch Experimente eine Grundvoraussetzung.

Im Projekt **NO_x-Modellierung mittels PDF-Transportgleichungen** [7] wird eine PDF-Transport Gleichung zur Beschreibung turbulenter reaktiver Strömungen eingesetzt. Die implementierten Modelle erlauben sowohl eine Beschreibung der Verbrennung von Wasserstoff als auch von Methan und wurden erfolgreich an experimentellen Daten einer Wasserstoff-Jet-Flamme und einer Pilot-Methan/Luft Flamme validiert. Für die Wasserstoffverbrennung war eine Vorhersage der Stickoxidbildung möglich [39].

Teilvormischung hat Vorteile gegenüber den konventionellen Verbrennungsmethoden wie Vormischverbrennung und Diffusionsverbrennung. Bei der Teilvormischung werden Brennstoff und Luft so gemischt, dass das Gemisch noch ausserhalb der Zündgrenze liegt. Ein solches System verhält sich in Bezug auf NO_x-Reduktion ähnlich wie Vormischflammen, jedoch ohne die Gefahr einer Rückzündung. 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. An einem 20-kW ELCO-Brenner mit Teilvormischung wurde durch Messungen ein erhebliches Schadstoffreduktionspotenzial für NO_x und CO nachgewiesen.

Im Projekt **Schadstoffreduktion durch Teil-Vormischung** [8] werden Teilvormischsysteme numerisch simuliert und dabei laminare und turbulente Teilvormischflammen detailliert untersucht, um ihr Potenzial bezüglich NO_x -Reduktion zu zeigen. Anhand experimenteller und numerischer Arbeiten wurde gezeigt, dass man mit Teilvormischung NO_x stark reduzieren kann. Neu wurde die chemische Reaktionskinetik detailliert analysiert mit der Zielsetzung, im fetten Bereich die genauen Reaktionsmechanismen zu bestimmen.

Im Projekt **Experiment turbulente Gegenstromflamme** [9] werden diese Simulationsprojekte experimentell unterstützt, um möglichst genaue Informationen zur Flammenstruktur in der Teil-Vormischverbrennung zu erhalten (Fig. 4).



Fig. 4: Flächenbrenner für Raman-Eichmessungen

Modellierung und Messung turbulenter Verbrennungsvorgänge 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. Neue numerische Ansätze werden im Projekt **Struktur turbulenter Diffusionsflammen** [10] untersucht. Dabei wird eine genügend detaillierte Verbrennungsschemie und die Tatsache, dass die Verbrennung in sogenannten Flamelets stattfindet, berücksichtigt. Da diese Simulationsrechnungen sehr zeitintensiv sind, werden zunächst einfache Geometrien behandelt. Die Gegenstrom-Diffusionsflamme ist ein gut geeignetes, aktuelles und international untersuchtes Forschungsobjekt.

Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung [11] heisst die Zusammenarbeit des LVV, des Seminars für angewandte Mathematik (SAM) der ETH-Zürich und des Lehrstuhls für technische Simulation der Universität Heidelberg. Die Simulation der hochkomplexen turbulenten Verbrennungsprozesse soll durch Einbezug realitätsbezogener Turbulenzmodelle und effizienter numerischer Methoden verbessert werden. Das am SAM entwickelte *Large Eddy Simulation* (LES)-Modell wurde erweitert und die Untersuchungen für zweidimensionale Strömungen

abgeschlossen [28]. Unter Einbezug des ETH-Instituts für Fluidodynamik wird dieses Vorhaben künftig weitgehend mit ETH-Mitteln weiterverfolgt.

SCHADSTOFFREDUKTION UND -ASPEKTE

Obwohl in der stationären Verbrennung Wirkungsgradverbesserungen des Brenners kaum mehr möglich sind, liegt noch ein grosses Verbesserungspotenzial bei der Schadstoffminimierung und in der Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades der Anlagen durch optimales Zusammenspiel aller Komponenten. Hingegen liegen beim Diesel- wie auch beim Ottomotor noch Verbesserungspotenziale sowohl beim Wirkungsgrad als auch bei den Schadstoffen brach. Die Stichworte Hochdruckverbrennung und "zündungsfreie Einspritzsysteme" sind heute brandheisse Forschung- und Entwicklungsthemen aller führenden Motorenhersteller. In diesen Themenkreisen ist die Forschung im BFE-Programm weltweit an vorderster Front dabei.

Detaillierte Kenntnisse der Strahlausbreitung und der -vormischung werden gemeinsam am LVV und am PSI im Projekt **Modellierung und Validierung von reaktiven, instationären 2-Phasenströmungen** [13] an den beiden Hochdrucktemperaturzellen (HTDZ) erarbeitet (Fig. 5). Bei Dieselmotoren ist ein geeigneter optischer Zugang zum Einspritzstrahl nur schwer und selten optimal machbar. Für Parameterstudien und Validierung der Simulationscodes sind spezielle Verbrennungszellen wie die HTDZ viel besser geeignet.

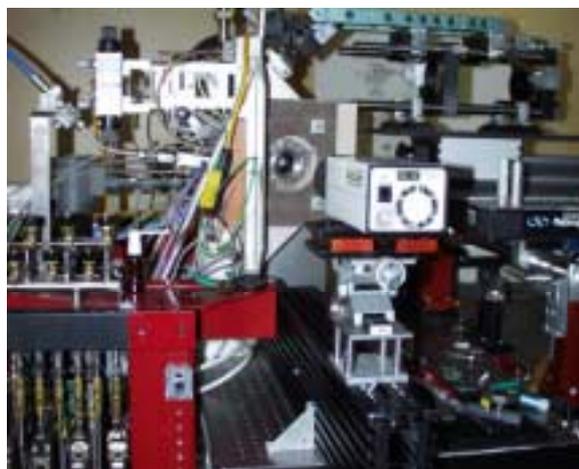


Fig. 5: Versuchsaufbau der HTDZ

Es wurden Arbeiten auf zwei Gebieten der mehrphasigen Diffusionsverbrennung (wie sie für Dieselmotoren typisch ist) durchgeführt: Einerseits mit Bezug auf die Charakterisierung von instationären Sprays in der HTDZ des LVV und andererseits im Hinblick auf den Einfluss von sauerstoffhaltigen Verbindungen auf die Russentstehung und Oxidation (in Zusammenarbeit mit dem PSI).

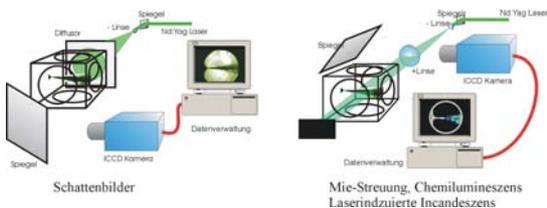


Fig. 6 : Messaufbau für die HTDZ-Experimente

Zur Visualisierung der Einspritzstrahlen kommen verschiedene zeitlich hochauflösende Messmethoden zum Einsatz und erlauben Messungen von Tropfengrößen und -Geschwindigkeiten an ausgesuchten Punkten im Einspritzstrahl (Fig. 6, 7).

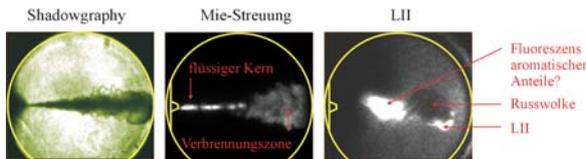


Fig. 7: Dieselinjektion mittels 150 μm -Einlochdüse mit 1000bar, Zellendruck: 80bar, Zellentemperatur: 900°K.

Bei den Sprayuntersuchungen wurden Schattenbilder und planare Aufnahmen der Mie-Streuung der flüssigen Phase unter verschiedenen motorrelevanten Bedingungen gewonnen. Erste PDA-Messungen zur lokalen Charakterisierung sind ebenfalls gestartet. Bei der Russminderung mit O_2 -haltigen Kraftstoffzusätzen wurden nebst qualitativen Aufnahmen in der HTDZ vorwiegend Laser-induzierte-Inkandescenz-Messungen (LII) an einem Diffusionsbrenner unter kontrollierten Bedingungen gemacht, welche erste wichtige Hinweise auf die grundlegenden Mechanismen der Russreduktion liefern.

Das Projekt **Erarbeiten von Grundlagen für inno-**

vative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse [14] in dem die Grundlagen der kontrollierten Zündung in der homogenen Diesel- und/oder Benzinverbrennung ohne externe Zündquelle erarbeitet werden sollen, befindet sich in der Anfangsphase. Parallel dazu fließen die Ergebnisse bei der Firma IVECO Motorenforschung AG, *Arbon*, in die Optimierung der Gemischaufbereitung ein im Hinblick auf eine darauffolgende Brennverfahrenentwicklung für Nutzfahrzeuge. Die Beteiligung der deutschen FVV durch einen zusätzlichen Beitrag (Entscheid Frühjahr/Sommer 2001) zur Untersuchung der reaktionskinetischen Grundlagen der kompressionsbedingten Zündung und homogenen Verbrennung wurde in Aussicht gestellt.

Die atmosphärische CO_2 -Konzentration stieg seit Beginn der Industrialisierung von 280 ppmv kontinuierlich auf heute 365 ppmv an. Beim Übergang von der letzten Eiszeit zur Nacheiszeit stieg sie, in diesem Falle infolge natürlicher Ursachen, von 200 ppmv auf 280 ppmv an. Diese Erkenntnisse basieren auf Resultaten von polaren Eisbohrkernen. Es ist Ziel des Projekts **Zuverlässigkeit der Rekonstruktion der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration anhand polarer Eiskerne** [15], die Zuverlässigkeit und die Präzision solcher Messungen zu verbessern. Im Berichtsjahr konnte der CO_2 -Anstieg beim Übergang von der letzten Eiszeit zur Nacheiszeit präzise und mit guter zeitlicher Auflösung rekonstruiert werden. Der Anstieg von insgesamt 76 ppmv erfolgte während 6000 Jahren in vier gut unterscheidbaren Intervallen. Eine recht gute Korrelation zwischen dem CO_2 Anstieg und der lokalen Temperatur in der Antarktis bestätigt, dass dem südlichen Atlantik bei diesem Anstieg eine Schlüsselrolle zukommt.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Aktivitäten der **Schweizerischen Vereinigung für Verbrennungsforschung (SVV)** werden laufend auf ihrer Webseite (<http://www.svv.ethz.ch/>) nachgeführt. In Berichtsjahr fanden folgende SVV Veranstaltungen statt:

Die dritte Generalversammlung der SVV fand am 30. Juni 2000 an der EMPA, *Dübendorf*, statt. Den SVV-Mitgliedern wurde die Möglichkeit offeriert, ihre Firma mit einem Link auf der SVV-Webseite vorzustellen. Die EMPA stellte ihr Zentrum für Abgas- und Partikelanalytik (ZAP) vor. Die komplexe Messtechnik im Bereich der Abgase aus Verbrennungsprozessen erfordert eine interdisziplinäre Arbeitsweise am ZAP. Mit den Themenkreisen Treibstoffzusätze, Abgasnachbehandlung, Partikelfiltersysteme für Dieselmotoren sind Synergien mit dem ZAP künftig durch gemeinsame Projekte zu nutzen.

Dem Thema **Zusammenarbeit Hochschule/Industrie** war die fünfte Jahrestagung der SVV gewidmet [34]. Die rund 50 Teilnehmer aus der Privatwirtschaft und den Hochschulen wurden über die laufenden Pilot- und Demonstrationsprojekte, die zur Zeit vorwiegend im Bereich der motorischen Verbrennung liegen, informiert. Den anwesenden Industriepartnern konnten die Vorteile der numerischen Simulation als Entwicklungswerkzeug eindrücklich demonstriert werden.

Das achte Jahrestreffen des **ERCOFTAC-Kompetenzentrums für Messtechnik, Verbrennung und Schadstoffbildung** (<http://www.ercoftac.org/>) wurde am 22. Mai 2000 mit rund 50 Teilnehmern aus Industrie und Hochschule am PSI durchgeführt. In zwanzig Vorträgen wurden praktisch alle laufenden Forschungs- und Pilot- und Demonstrationsprojekte vorgestellt [32].

Introduction to Numerical and Experimental Methods in Combustion Research war der Titel der vom 4. – 9. September 2000 in Zürich durchgeführten ERCOFTAC-Sommerschule. Mit rund 25 motiviert mitarbeitenden Studenten und Doktoranden war dem von LVV, LTNT und PSI hervorragend organisierten Blockkurs ein voller Erfolg beschieden.

Am *IEA-Task-Leaders Meeting* [33] in Stockholm (<http://www.im.na.cnr.it/IEA>) konnten die Kontakte mit den schwedischen Forschern weiter vertieft werden. Wichtige Sandia (USA)-Vertreter waren leider abwesend. Es wurde festgestellt, dass simultane Messungen mehrerer Parameter, die mit grösseren Fehlern behaftet sind, mehr Informationen über den Verbrennungsprozess liefern als die hochpräzise Messung eines einzigen Parameters. Da es immer noch mehr verschiedene Modelle als experimentelle Messungen gibt, erlangen Messungen an gut beschreibbaren Brennern wieder vermehrte Aufmerksamkeit.

Wichtige Konferenzen im Berichtsjahr waren der *SAE World Congress 2000, March 6-9, Detroit (USA)* sowie das *Combustion Symposium, July 30 – August 4,*

Edinburgh, (UK), an denen das Programm mit mehreren Beiträgen vertreten war. Im März 2000 fand in Stuttgart die vom LTNT in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart organisierte 2. Europäische Kleinbrenner-Konferenz (ECSBT2) statt. Das 150-köpfige Teilnehmerfeld aus Industrie und Hochschule bestätigte, dass dieser Anlass einem Bedürfnis entspricht. Die 3. Auflage ist für 2003 in Aachen geplant.

Mit dem Leiter des Forschungsfonds der Erdölvereinigung (FEV), Dr. M. Berg, wurde vereinbart, das vom Programm *Feuerung & Verbrennung* aufgebaute Fachwissen an der ETH- und am PSI vermehrt in den vom FEV geförderten Projekten zu nutzen. Bei Bedarf kann auch eine Mitfinanzierung von FEV-Projekten (z. B. die Übernahme eines ETH/PSI Zusatzteils) durch das BFE erfolgen.

Anlässlich der Sitzung der Eidgenössischen Energieforschungskommission (CORE) vom 20. September 2000 wurde das Programm *Feuerung & Verbrennung* 2000-2003 von der Kommission im wesentlichen genehmigt.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Bereich der motorischen Verbrennung verschärft sich der politische Druck in Richtung massiv niedrigerer Schadstoffemissionen nochmals. Die US- und europäische Gesetzgebung haben eine klare Marschrichtung vorgegeben, wodurch im Bereich Personen- und Güterverkehr die Schweiz auch von der Immissionsseite her deutlich tangiert wird. Die nationale, zumeist mittelständische Verbrennungs-Industrie arbeitet daher vermehrt mit den über entsprechende Kompetenz verfügenden Schweizer Forschungsgruppen zusammen, um gegen die oft grössenmässig übermächtige internationale Konkurrenz bestehen zu können.

Dank der massgebend durch das BFE geleisteten konsequenten und langfristigen Unterstützung der Fachkompetenz im Grundlagenbereich an der ETH-Zürich und am PSI (letzteres insbesondere im Hinblick auf die stationäre Hochdruckverbrennung in Gasturbinen) konnte im Berichtsjahr die Zusammenarbeit mit der Industrie wiederum erhöht werden. Im nationalen Rahmen laufen mit LIEBHERR drei Projekte, mit Alstom Power zwei Projekte, mit IVECO zwei Projekte, mit KISTLER ein Projekt und mit Wärtsilä NSD zwei Projekte. Im internationalen Rahmen werden ein EU-Projekt mit BOSCH, AVL und IVECO, mit der europäischen Forschungsvereinigung für Verbrennungskraftmaschinen (FVV) ein Projekt und mit Daimler Chrysler, VW und BOSCH ein neues Projekt über kleine Gasmotoren bearbeitet.

Im Rahmen des nun abgeschlossenen Projekts **Swiss Common Rail** wurde der Beweis erbracht, dass die EURO-III Normen prinzipiell ohne Abgasrezirkulati-

on und -nachbehandlung mittels Hochdruck Common Rail Einspritzung erfüllt werden können. Im von den Industriepartnern LIEBHERR und HYDROMAG unterstützten Folgeprojekt **Common Rail Brennverfahren für EURO-III und EURO-IV-taugliche Nutzfahrzeugdieselmotoren** [16] wird untersucht wie die noch schärferen Emissionsgrenzwerte EURO III und IV für LIEBHERR-Motoren zu erfüllen sind. Durch Additivierung von Butylal zu herkömmlichem Dieselmotorkraftstoff konnte gezeigt werden, dass die Partikelemissionen stark gesenkt werden. Beim Betrieb mit reinem Butylal lagen die Partikelemissionen nahe der Nachweisgrenze. Die gekühlte Abgasrückführung eröffnet auch für diese Anwendung neue Möglichkeiten für die NO_x-Reduktion.

Im Rahmen des KTI-Projekts **Partikel aus der motorischen Verbrennung** konnte u.a. die Partikelgrössenverteilung bei der Verbrennung verschiedener reiner Brennstoffe sowie auch von Diesel-Butylal-Gemischen charakterisiert werden. Dabei hat es sich gezeigt, dass sowohl der Brennstoff als auch das Brennverfahren (Einspritzsystem, Einspritzparameter und Abgasrückführung) einen sehr grossen Einfluss auf die Anzahl und Grösse der vom Dieselmotor emittierten Russpartikel haben [31].

Das Projekt **Einsatz der rechnergestützten Simulation (CRFD) für die turbulente Verbrennung in der industriellen Produktentwicklung** [17] befindet sich in der Abschlussphase. Ermutigt durch die bisherigen sehr guten Fortschritte reichen Wärtsilä NSD und LVV unter substantieller Beteiligung des Industriepartners ein neues KTI-Gesuch ein. Ziel ist

die Implementierung der Grundlagenmodelle aus der KIVA-3 Entwicklung in einen kommerziellen, für die industrielle Produktentwicklung tauglichen Code und insbesondere die Erweiterung und Anpassung des Verbrennungsmodells auf die speziellen Bedingungen von sehr grossen, langsamlaufenden Dieselmotoren.

Im Programm **Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung** wurde das Projekt **Swiss Motor** wesentlich vorangetrieben und im Programm *Feuerung und Verbrennung* mit zwei verschiedenen Konzepten erfolgreich zum Abschluss gebracht. Die Arbeiten an der EPFL [18] führten zu einem Magermotor, der die Schweizer-LRV-Grenzwerte für Biogas mit Abstand und diejenigen für Erdgas ohne Katalysator nur knapp erfüllt. Die detaillierten Resultate der Untersuchung sind in einer Dissertation [30] aufgelistet. Die Arbeiten am LVV [19] innerhalb dieses Projekts werden nach den beeindruckenden Erfolgen vom Jahr 1999 nun vom FOGA für die Abschlussphase (bis 31.12. 2000) finanziert. Der am LVV-Liebherr Motor erreichte Wirkungsgrad von über 41 % (dieselmotorische Werte) bei gleichzeitigen NO_x -Emissionen von wenigen ppm (also weniger als bei einer modernen Gasturbine!) wird zur Zeit im Hinblick auf dessen Realisierung im Feldversuch getestet. Die Firma DIMAG AG hat inzwischen eine Feld- und markttaugliche WKK-Anlage mit einem LIEBHERR-LVV Gasmotor ausgerüstet. Damit sollen im kommenden Jahr Feldtests durchgeführt werden und das Projekt Swiss Motor dem Programm *Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung* zurückgegeben werden. Es wird dort bereits die Regelung des Motors für den Einsatz in der Praxis bearbeitet [20] und erste Resultate weisen auf eine hervorragende Regelungscharakteristik hin.

Im Projekt **NO_x -Reduktion beim YGNIS Varinobrenner** [23] wird in Zusammenarbeit mit YGNIS der Matrixbrenner optimiert. Die flammeninterne Rezirkulation oberhalb der Matrixplatte ist die Schlüsselgrösse für die NO_x -Reduktion. Herkömmliche 2D stationäre Rechnungen mit dem k-e Modell geben diese nur schlecht wieder. Es wird deshalb eine neue 3D instationäre Rechenmethode anhand eines ausgemessenen Modellbrenners validiert.

Das PSI bearbeitet mit der Firma Lambiotte (B) das Projekt *Investigation of Soot and NO-Production in Spray Combustion of Acetal/Diesel Mixtures* [26] mit dem Ziel, die motorische Diesel Spray-Verbrennung in der HTDZ zu untersuchen. Spray- und Verbrennungsvorgänge wurden mittels Schattenbildern, Mie-Streuung, Bildern der natürlichen Fluoreszenz und (LII) erfasst (Fig. 6, 7). Experimente am Dieselmotor zeigen für Beimischungen von sauerstoffhaltigen Additiven zum Treibstoff eine Abnahme des Russausstosses. Um die Mechanismen der Russbildung in Abhängigkeit verschiedener Brennstoffbeimischungen und auch im Betrieb mit Pflanzenöl abzuklären, werden Messungen an einem Wolfhard-Parker Brenner durchgeführt und anschliessend unter dieselmotorischen Bedingungen an der HTDZ geprüft.

Bei Gasturbinen lassen sich durch die Vormischverbrennung wesentlich tiefere Schadstoffwerte erreichen. Inhomogenitäten in der Wärmefreisetzung können aber zu beträchtlichen Druckschwankungen in der Brennkammer und damit zu einer erhöhten mechanischen Belastung der Brennkammer und zur Rückkoppelung auf die Mischung von Brennstoff und Luft führen. Ziel der Zusammenarbeit mit Alstom Power im PSI-Teilprojekt **Homogene Gasverbrennung** [21, 37, 38] ist die Erforschung der Wechselwirkungen von thermoakustischen Phänomenen mit Parametern wie Mischungsqualität oder Flammenstrukturen. Eine erste Messkampagne zur Bestimmung der phasengemittelten Verteilung des OH-Radikals mit laser-induzierter Fluoreszenz wurde durchgeführt und ein Teststand von Alstom Power aufgebaut. Auf Initiative von Alstom Power ist ausserdem ein neuer Vorstoss im Bereich der Thermoakustik in Zusammenarbeit mit der ETH und dem PSI in Vorbereitung.

Im LVV-Teilprojekt **Flammenstruktur und NO_x -Bildung in turbulenten Vormischflammen** [22] werden grundlegende Beiträge zum Verständnis der Wechselwirkung zwischen Strömungsfeld (Turbulenzparameter), Flammstruktur und -geschwindigkeit (Stabilisierung) sowie NO_x -Bildung in der Vormischverbrennung erarbeitet. Um einen grösseren Parameterbereich innerhalb der turbulenten vorgemischten Verbrennung abzudecken, wurde der erste Versuchsträger (Matrixbrenner) zu einem Düsenbrenner umgestaltet:

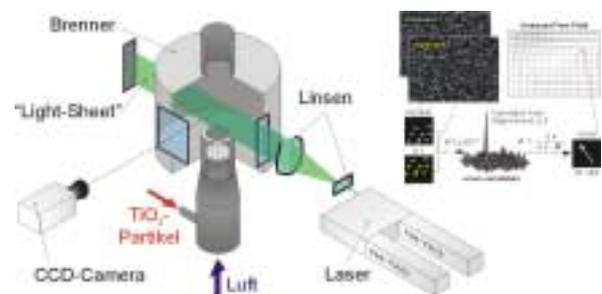


Fig. 8: Experimenteller Aufbau des PIV-Systems sowie dessen Prinzip der Bildauswertung (oben rechts).

Der optimierte Versuchsträger, mit variablen Strömungsverhältnissen durch turbulenz erzeugende Gitter sowie Flammenstabilisierung über Pilotflammen, ermöglicht nun die Abdeckung eines breiten Bereiches charakteristischer Flammen, gemäss dem Borghi-Diagramm. Zusätzlich ist eine Luft-Vorwärmung, zur Untersuchung temperaturabhängiger Flammenparameter bei gleichen Strömungsbedingungen, implementiert. Die Strömungsuntersuchungen bzw. Messung der Turbulenzparameter konnte mit der planaren Methode *PIV* für alle zu untersuchenden Flammen vollständig abgeschlossen werden (Fig. 8). Die direkte Erfassung des 2-D Geschwindigkeitsfeldes in der Gemischzone vor der Flammfront bzw. statistische Analysen aus umfangreichen Messreihen er-

möglichen nun eine Klassifizierung der spektroskopisch untersuchten turbulenten, vorgemischten Flammen Fig. 9).

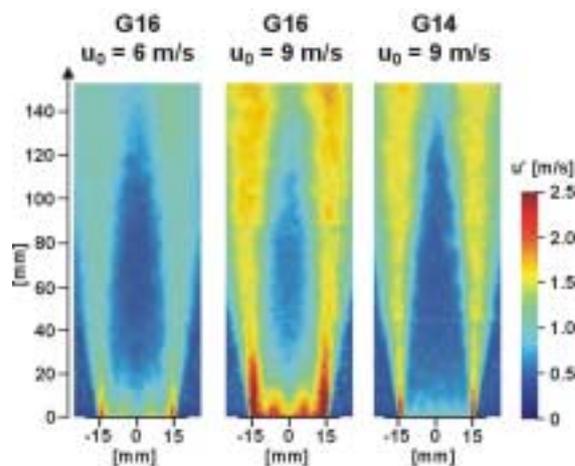


Fig. 9: Aus PIV-Messungen ermittelte Turbulenzintensität u' für zwei verschiedene Gitter bzw. mittlere Geschwindigkeiten.

Entsprechende spektroskopische Untersuchungen hinsichtlich Flammenfrontkontur (*OH-LIF*) und NO-Bildung (*NO-LIF*) bzw. deren Auswertung sind grösstenteils erfasst oder in der Endphase der Bearbeitung. Damit wurde eine neue, umfassende experimentelle Datenbasis für die Validierung der Simulation der turbulenten Verbrennung geschaffen. Die entsprechende Dissertation befindet sich in der Abschlussphase.

Die Druckmessung im Verbrennungsraum sind bei der Motorenentwicklung in den letzten Jahren zum Standardwerkzeug geworden. Die immer strenger werden-den Abgasgrenzwerte fordeenn neue Analysewerkzeuge in der Motorenentwicklung. Im Projekt **Demonstration eines optischen Sensors zur Unterstützung der Entwicklung von schadstoffarmen motorischen Verbrennungssystemen** [25] wurde in Zusammenarbeit zwischen der Firma KISTLER, Winterthur (weltmarktführend für Sonden und Sensoren im motorischen Bereich) und dem LVV ein passives optisches Messsystem zur Durchführung von Messungen an Dieselmotoren ausgelegt und aufgebaut (siehe Titelbild). Das System zeichnet sich durch eine niedrige Verschmutzungsanfälligkeit, hohe Flexibilität bezüglich des betrachteten Sichtbereichs und im Vergleich zu marktüblichen Preisen niedrigen Kosten aus. Da das System kurbelwinkelaufgelöste Informationen über die Russpartikelkonzentration sowie die Temperatur des verbrannten Gases liefert, ist es ein gutes Hilfsmittel zur Deutung der am Auslass gemessenen Russemissionen. Es eignet sich aber auch zur

Validierung der Messungen verschiedener Grundlagenprojekte [5,14]. Das Messsystem soll im nächsten Jahr im Rahmen eines KTI-Projekts (KISTLER/LVV) zur Marktreife gebracht werden.

Im Vorhaben **NO_x-Reduktion mit Harnstoff-SCR** (selektive katalytische Reduktion) [24] wird die Realisierbarkeit von Harnstoff-SCR bei Fahrzeugen untersucht. Ziel der Arbeit ist die Entwicklung beschichteter SCR-Katalysatoren, die beim Einsatz an mobilen Dieselmotoren, d.h. bei instationärem Betrieb, bessere Eigenschaften aufweisen sollten. Auf dem PSI-Prüfstand sind drei verschiedene SCR-Katalysatoren – jeweils mit und ohne Vorkatalysator – ausgemessen worden. Durch den Vorkatalysator konnte jeweils eine Verbesserung der SCR-Performance erzielt werden. Bei den Beschichtungskatalysatoren konnten eindeutige Aussagen zur Aufklärung der Reaktionsmechanismen bei tiefen Temperaturen mit Mischungen von NO und NO₂ gemacht werden [35]. Wegen Mangel an qualifizierten Mitarbeitern bei LIEBHERR müssen die ergänzenden Arbeiten auf dem Dieselmotorenprüfstand bei LIEBHERR für den 6-Zylinder-Dieselmotor zurückgestellt werden. Ausserdem fliesst das PSI-Fachwissen direkt in das Verbundprojekt "GD-Kat" der deutschen Automobilindustrie ein, das die Weiterentwicklung von Harnstoff-SCR für den PKW-Dieselmotor zum Ziel hat.

Das LVV arbeitet auch im Auftrag der FVV, die Mitglieder (Automobilhersteller und -zulieferer) aus dem gesamten EU-Bereich vereint.



Fig. 10: Ausbreitung des Sprays bei $T = 300^{\circ}\text{K}$ und $p=5.4$ bar (Experiment und Simulation).

Beim vom BFE und von der FVV gemeinsam finanzierten Vorhaben **Modellbildung DI-Ottomotor** (direct injection) [27] wurden sowohl experimentell als auch in der Simulation wesentliche Fortschritte in der Formulierung der Simulation des Hochdruckprozesses des direkt eingespritzten Ottomotors gemacht. Die Vorgänge der Kraftstoffeinbringung und -verdampfung in ein geschlossenes System wurden detailliert berücksichtigt. Mit dem implementierten Ansatz ist eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation erreicht worden.

Bewertung 2000 und Ausblick 2001

Es genügt nicht, durch innermotorische Massnahmen Schadstoffreduktionen und Wirkungsgradverbesserungen am Labormotor nachzuweisen. Vielmehr müssen diese Fortschritte durch weitere Massnahmen im Gesamtsystem (z.B. Auto) konsequent optimiert werden. Hier eröffnet sich ein breites Feld für die Fachhochschulen, um in enger Zusammenarbeit mit den Hochschulen und interessierten Industriepartnern eine rasche Umsetzung anzustreben. Ab Frühling 2001 wird ein LIEBHERR Vierzylindermotor am LVV in Betrieb genommen, um Massnahmen wie Common-Rail-Einspritzung, Abgasrückführung und Partikelfilter am Vollmotor zu evaluieren.

Die immer mehr auf Initiative von renommierten internationalen Partnern zustandekommenden Kollaborationen der Schweizer Forschungsstellen sind zweifelsohne ein klares Zeichen für deren Kompetenz. Das gleiche gilt für die Relevanz der Forschungsschwerpunkte, wenn man als Beurteilungsmassstab die sehr hohe Umsetzungskadenz im produktnahen Bereich (Industriepartnerschaften) zugrunde legt. Im Sinne der Konzentration der Kräfte erscheint es auch deswegen als sinnvoll, für geeignete, stark auf die unmittelbare Entwicklung ausgerichtete Projekte die Unterstützung der Fachhochschulen in Anspruch zu nehmen. Voraussetzung dazu ist allerdings, dass man alles unternimmt, um auch die Grundlagenkompetenz der akademischen Forschungsgruppen mindestens zu halten, wenn nicht sogar zu stärken. Ansonsten hat die Schweiz in etwa 10 Jahren kaum ein realistisches Innovationspotenzial auf diesem volkswirtschaftlich und energie- und umweltmässig sehr relevanten Gebiet.

Die Verabschiedung des Forschungsprogramms *Feuerung & Verbrennung 2000-2003* durch die CORE bestätigte auch den schon früher georteten Handlungsbedarf betreffend Verstärkung der Öffentlichkeitsarbeit und Präsenz des Programms im Internet sowie vermehrtem Publizieren von Fachartikeln für ein breiteres Publikum. Diesem Anliegen wird 2001 mit hoher Priorität nachgegangen werden.

Ein Anlass, der in diesem Sinne genutzt werden kann, ist die 17th *Annual Conference on Liquid Atomization*

& *Spray Systems* (ILASS), die vom 2. – 6. September 2001 in Zürich unter der Federführung des LVV durchgeführt wird.

Im Jahr 2001 soll auch das neu geschaffene KTI-Energiebudget für wirtschaftsorientierte Projekte des Programms genutzt werden. Zur Zeit sind mindestens vier neue KTI-Projektvorschläge zur Verstärkung der Umsetzung (1 Kistler-, 1 NSD- und 2 Alstom-Projekte) in Vorbereitung.

2001 sollen auch die Fachhochschulen gezielt und in enger Zusammenarbeit mit der CORE und dem entsprechenden Verantwortlichen bei der KTI [29] ins Programm eingebunden werden. Die an der Fachhochschule Brugg-Windisch geplante SVV-Tagung 2001 mit Thema Zusammenarbeit Hochschulen/Fachhochschulen und Privatwirtschaft soll dazu genutzt werden.

Trotz der erfolgreichen Anwendung der numerischen Simulation des LTNT bei ihren Industriepartnern (Oertli Novobloc-Brenner und YGNIS Varino-Brenner) wurde die früher starke heimische Brennentwicklung und -konstruktion in den letzten Jahren fast vollständig ins Ausland verlagert. Künftig werden daher die Umsetzungsprojekte des LTNT – wie z.B. der visierte Super Low NO_x-Brenner – nur noch im Rahmen eines EU-Projekts realisierbar sein. Hingegen zeichnet sich im Bereich Anwendung der Simulation stationärer Verbrennung eine verstärkte Zusammenarbeit mit der Gasturbinenindustrie (Alstom Power) ab.

Die stärkere Koordination zwischen den Forschungsförderungsorganen (BFE, FEV, <http://www.petro.ch/> und FOGA, <http://www.svgw.ch/>) ist ein Prozess, der im Jahr 2000 mit einer neu konzipierten Begleitgruppe mit Vertretern des BFE, FEV, FOGA, BUWAL und der Privatwirtschaft eingeleitet wurde und 2001 fortgesetzt wird. Insbesondere wird die Begleitgruppe durch die im Jahr 2001 durchzuführende Evaluation des Programms "Feuerung & Verbrennung" stark gefordert sein.

Liste der Projekte

(JB) Jahresbericht 2000 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

- [1] J. Lee et al. LVV/ETH-Zürich: *Turbulente, chemisch reaktive Strömung in Motorenkammern* (JB)
- [2] I. Mantzaras et al. PSI-Villigen: *Tieftemperaturverbrennung bei hohen Drücken* (JB)
- [3] P. Griebel, PSI-Villigen: *Struktur turbulenter Vormischflammen unter Hochdruck* (JB)
- [4] T. Gerber et al. PSI-Villigen: *Thermochemische Charakterisierung und spektroskopischer Nachweis von Sauerstoffverbindungen im Zusammenhang mit der Verbrennung sauerstoffhaltiger Brennstoffe* (JB)

- [5] T. Gerber et al. PSI-Villigen: *Verbrennungsreaktionen in Gegenwart sauerstoffhaltiger Brennstoffe* (JB)
- [6] W. Hubschmid et al. PSI-Villigen: *Laserspektroskopische Methoden zur Analyse von Flammen und Brennstoffsprays* (JB)
- [7] A. Obieglo und J.Gass, LTNT/ETH-Zürich: *NO_x-Modellierung mittels PDF-Transportgleichungen* (JB)
- [8] P. Bajaj und J.Gass, LTNT/ETH-Zürich: *Schadstoffreduktion durch Teil-Vormischung* (JB)
- [9] L. Blum et al., LTNT/ETH-Zürich: *Experiment turbulente Gegenstromflamme* (JB)
- [10] L. Demiraydin und J. Gass. LTNT/ETH-Zürich: *Struktur turbulenter Diffusionsflammen* (JB)
- [11] R. Jeltsch et al., SAM/ETH-Zürich: *Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung* (JB)
- [12] B. Ineichen, LVV/ETH-Zürich: *Ermittlung des geometrischen Aufbaus von Russ-Primärpartikeln und Validierung der Simulation des Russbildungsmechanismus* (SB)
- [13] K. Boulouchos et al., LVV/ETH-Zürich: *Modellierung und Validierung von reaktiven, instationären 2-Phasenströmungen* (JB)
- [14] K. Boulouchos et al., LVV/ETH-Zürich: *Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse* (JB)
- [15] B. Stauffer, UNI-Bern: *Zuverlässigkeit der Rekonstruktion der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration anhand polarer Eiskerne* (JB)

Liste der P+D-Projekte

- [16] R. Schubiger et al., LVV/ETH-Zürich: *Common Rail Brennverfahren für EURO-III und EURO-IV-taugliche Nutzfahrzeugdieselmotoren* (JB)
- [17] K. Boulouchos et al., LVV/ETH-Zürich: *Einsatz der rechnergestützten Simulation für die turbulente Verbrennung in der industriellen Produkteentwicklung (CRFD)* (JB)
- [18] R. Röthlisberger et al., LENI/EPF-Lausanne, K. Boulouchos et al., LVV/ETH-Zürich: *Swiss-Motor, Demonstration eines besonders umweltfreundlichen Gasmotors für den stationären Einsatz* (SB)
- [19] Ch. Nellen et al., LVV/ETH-Zürich: *Swiss Motor, FOGA Projekt*
- [20] Ch. Nellen et al., LVV/ETH-Zürich: *Regelung des Swiss Motors für den Einsatz in der Praxis* (SB).
- [21] W. Hubschmid et al. PSI-Villigen: *Homogene Gasverbrennung* (JB)
- [22] K. Herrmann et al., LVV/ETH-Zürich: *Flammenstruktur und NO_x-Bildung in turbulenten Vormischflammen* (JB)
- [23] J. Gass et al. LTNT/ETH-Zürich: *NO_x-Reduktion beim Ygnis Varino-Brenner* (JB)
- [24] M. Koebel, PSI-Villigen: *NO_x-Reduktion mit Harnstoff-SCR* (JB)
- [25] B. Ineichen et al., LVV/ETH-Zürich: *Demonstration eines optischen Sensors zur Unterstützung der Entwicklung von schadstoffarmen motorischen Verbrennungssystemen*
- [26] Th. Gerber, PSI-Villigen: *Investigation of Soot and NO-Production in Spray Combustion of Acetal/Diesel Mixtures* (JB)
- [27] M. K. Eberle, LVV/ETH-Zürich: *Modellbildung Direct Injection (DI) Ottomotor* (JB)

Referenzen

- [28] A. Hintermann: *Forschungsprogramm 2000-03 "Feuerung&Verbrennung"*, BFE, (Bezug bei Programmleiter möglich)
- [29] A. Hintermann: Zusatz zum *Forschungsprogramm 2000-03 "Feuerung&Verbrennung"*, z.Hd. CORE

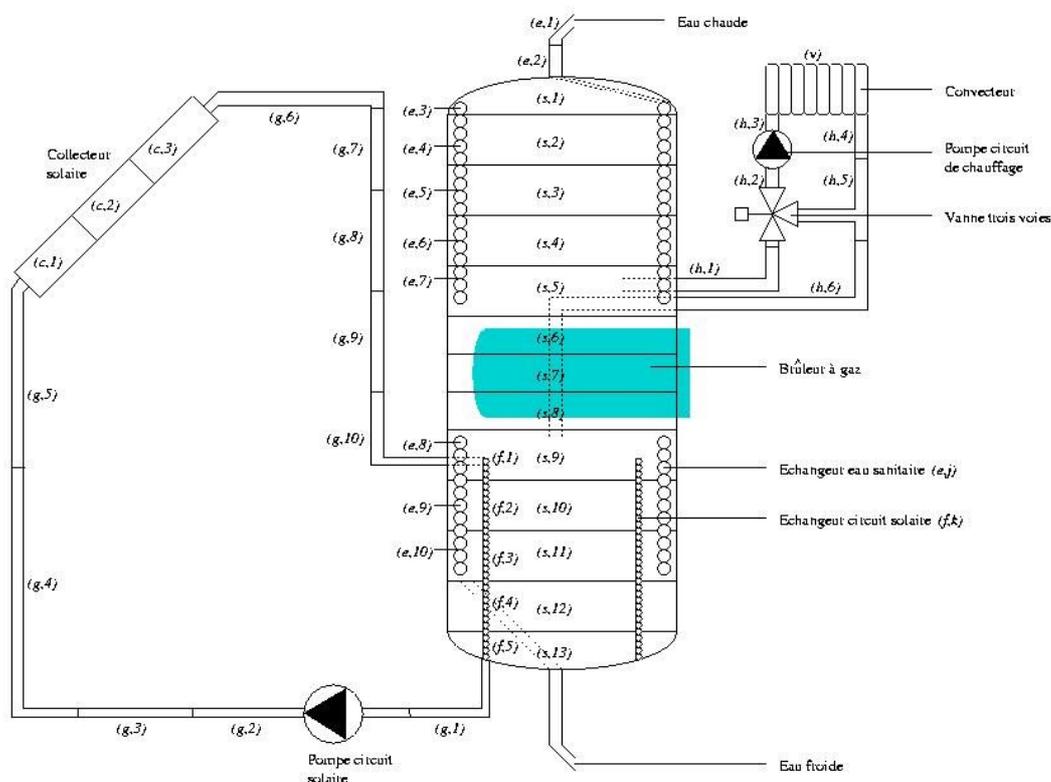
- [30] R. Röthlisberger: *Modification d'un moteur diesel pour le fonctionnement au gaz naturel en cogénération*, Dissertation ETH-Lausanne, (2001)
- [31] A. Bertola and K. Boulouchos, *Oxygenated Fuels for Particulate Emissions Reduction in Heavy-Duty Diesel Engines with Common-Rail Fuel Injection*, SAE 2000-01-2885
- [32] W. Hubschmid, *Programm und Abstracts des achten Jahrestreffens des ERCOFTAC-Kompetenzzentrums für Messtechnik, Verbrennung und Schadstoffbildung*, Mai 2000
- [33] G. B. Drummond, Ed.: *XXI Task-Leaders-Meeting*, Proc. IEA-Conf. Stockholm, August 2000
- [34] J. Gass, *Programm und Abstracts der fünften Jahrestagung der (SVV)*, Oktober 2000
- [35] M. Koebel, M. Elsener: *Reaction Pathways in the SCR Process with NO and NO₂ at low Temperatures*, Ind. Eng. Chem. Res., in Press und *Entstickung von Dieselabgasen mit Harnstoff-SCR bei tiefen Temperaturen*. MTZ, im Druck.
- [36] K. Boulouchos, *Strategies for Future Engine combustion Systems – Homogeneous or Stratified Charge?*, SAE-Paper 2000-01-0650.
- [37] T. B. Gradinger *et. al.*: *Liquid-Fuel/Air Premixing in Gas Turbine Combustors: Experiments and Numerical Simulation*, COMBUSTION AND FLAME 124, 2000.
- [38] A. Arnold *et. al.*, *Fuel-Oil Concentration in a Gas Turbine Burner Measured with Laser-Induced Fluorescence*, Experiments in Fluids 229 (2000).
- [39] A. Obieglo: *PDF Modeling of H₂ and CH₄ Chemistry in Turbulent Nonpremixed Combustion*. Dissertation ETH Nr. 13936
- [40] A. Obieglo *et. al.*, *PDF Simulation with Repro-Modeling of a Turbulent Non-Premixed Hydrogen Jet Flame*. 28th Symposium (Intern.) of Combustion, Edinburgh, WIP-Poster 5FRIC17, 2000.
- [41] H.-M. Frey *et. al.*, *Determination of Rotational Constants in a Molecule by Femtosecond Four Wave Mixing*, J. Raman Spectrosc., 31, 71 (2000).
- [42] A.P. Kouzov, P.P. Radi, *Collision Induced Resonances in Two Colour Resonant Four Wave Mixing Spectra*, Phys. Rev. 63A (2000).

SOLAIRE ACTIF: CHALEUR

Rapport de synthèse
sur les activités 2000 du programme de recherche

Jean-Christophe Hadorn

jchadorn@swissonline.ch



Systèmes solaires combinés

Banc d'essai mis au point par le SPF à Rapperswil, et modèle de simulation, réalisé par l'Institut d'automatique de l'EPF-Lausanne, pour optimiser le fonctionnement et la régulation de l'ensemble (Photo SPF Rapperswil ; schéma Institut d'automatique de l'EPF-Lausanne & EIVD, Yverdon)

Centres de gravité du programme

Le programme « Solaire actif : chaleur » a été organisé en 2000 autour des trois centres de gravité suivants :

1. Connaissance scientifique des **capteurs solaires thermiques, des matériaux et des systèmes**, notamment les kits solaires pour l'eau chaude sanitaire et systèmes combinés. Le Centre national d'héliotechnique SPF à Rapperswil est le garant de la qualité des composants et des systèmes sur le marché en Suisse et propose des améliorations des produits provenant des industriels du solaire qui soumettent un capteur en test.
2. Étude de **systèmes combinés standardisés** pour le chauffage et l'eau chaude dans les villas, en collaboration internationale dans le cadre de la Tâche 26 du programme « *Solar Heating and Cooling* » de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie), et en liaison avec l'industrie solaire suisse et européenne.
3. Premiers tests d'un prototype de **mini-centrale solaire thermique "SPS" 10 kW électriques**.

Buts visés pour 2000

a) *Logistique*

Le retour des expériences des utilisateurs avec la version 3.0 de POLYSUN était souhaité pour modifier le logiciel si nécessaire.

La distribution du deuxième CD-ROM « SPF Info » était planifiée.

La mise en place des outils logiciels de simulation des systèmes avec stockage saisonnier au Laboratoire du SUPSI au Tessin était attendue.

b) *Composants*

La mise en place d'un nouveau banc d'essai pour les systèmes dits « combinés eau chaude + chauffage par le solaire » devait avoir lieu à Rapperswil

Le SPF devait assurer l'industrie solaire de son soutien en matière de tests et d'amélioration de la durabilité des installations.

c) *Systèmes*

Le banc de mesures de chauffe-eau solaires du SPF devait être maintenu opérationnel.

Les tests de qualité des capteurs devaient être organisés à Rapperswil de manière routinière et convaincan-

te pour les industriels qui doivent payer la prestation.

Le groupe d'Yverdon, associé à l'Institut d'automatique de l'EPF-Lausanne, devait utiliser son banc d'essai pour systèmes combinés, afin d'optimiser le fonctionnement d'un système industriel et de découvrir de nouvelles manières de régler le système en permanence au point de fonctionnement optimal. La collaboration à la Tâche AIE 26 devait apporter une qualification des systèmes combinés et indiquer des pistes d'amélioration.

Le projet de SPS (*Solar Power System*) du Laboratoire d'Énergétique Industrielle, LENI/EPF-Lausanne, et COGENER, mini-centrale électrosolaire de 10 kW_{el} devait avoir fonctionné durant 2000 avec deux lignes de capteurs et un appoint par moteur à cogénération, et produit les premiers kWh électro-solaires.

d) *Installations*

Les budgets limités n'ont pas permis de réaliser des mesures d'installation solaire hors des laboratoires.

Des publications et une présence de qualité à *Eurosun 2000* des chercheurs de Rapperswil étaient demandées.

Travaux effectués et résultats obtenus

a) *Logistique et logiciels*

En 2000, le logiciel **METEONORM 4.0 Édition 2000** a rencontré un succès sur le marché mondial.

Le support du logiciel **POLYSUN 3.0** a été très demandé. Les questions les plus fréquentes et les réponses du SPF, ainsi que les mises à jour sont désormais publiées sur [Internet](#). En 2000, 100 nouvelles licences ont été vendues. Polysun 3 est basé sur un modèle de simulation dynamique des composants et a été donc profondément remanié depuis la version 2. Une validation complète du logiciel est impossible avec les

moyens financiers à disposition. Des exercices de validation partielle ont été entrepris par le SPF, suite à diverses questions d'utilisateurs passant de la version 2 à la version 3 et ne retrouvant pas toujours leurs résultats. Une mise à jour version 3.3 du logiciel a été distribuée en mai pour 99 CHF avec, notamment, les calculs d'écobilan et de dimensionnement de la pompe solaire intégrée. Le logiciel est continuellement amélioré dans son interface utilisateur et les configurations simulables sont étendues pour s'adapter au marché des installations solaires combinées. Un contrat a été signé avec un distributeur pour l'Allema-

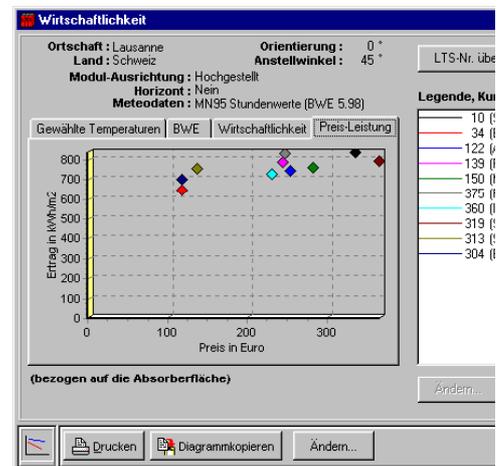
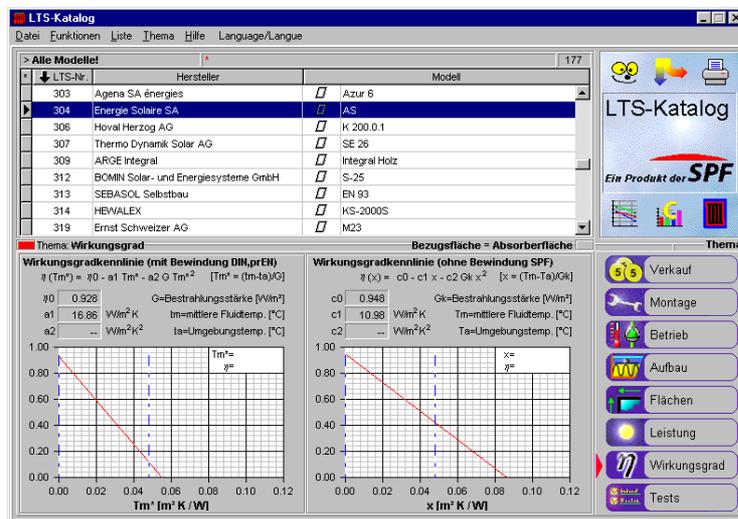
gne, le plus gros marché du solaire en Europe, pour augmenter les ventes. Polysun 4.0 est en chantier pour 2001. Polysun est un outil de recherche au service des concepteurs. Il n'est pas prévu de version Internet pour le moment [1D].

Le CD ROM « SPF Info » intitulé « **Données et Tableaux 2000** » a été produit et distribué à 5'000 adresses en Europe. Il permet de connaître les caractéristiques et les performances de 160 capteurs solaires testés en Suisse et, nouveauté 2000, de 20 capteurs mesurés dans d'autres instituts d'Europe selon la norme européenne. Les capteurs peuvent être comparés entre eux dans leur efficacité énergétique et économique. Cela nécessite un travail important de mise à jour des prix de capteur. Les informations sont en deux langues et le CD fonctionne sous PC, Mac et Unix. Il comporte en outre des publications du SPF et 9 programmes solaires en démonstration. Le CD-

ROM est un véhicule très important de transfert de connaissance du SPF vers le marché solaire [1D].

Le [site Internet du SPF](http://www.solarch.ch/) a été très fréquenté (230 pages vues par jour, le double de 1999). Ce sont surtout les résultats des tests des capteurs qui sont recherchés. Le site est trilingue et nécessite une maintenance constante. Le site a été porté sur le serveur central de l'HSR simplifiant la maintenance pour le SPF [1D]. **Les sites des programmes de recherche « Solaire actif - chaleur » et « Stockage de chaleur »** ont été redessinés pour être disponibles en 2001 indépendamment du SPF sous un toit commun avec le programme photovoltaïque, et qui aura pour adresse <http://www.solarch.ch/>.

Le système d'acquisition de données du SPF a été renforcé, notamment pour supporter le nouveau banc de test des systèmes combinés et tous les équipements ont été maintenus en ordre de fonctionnement [1D].



Le catalogue électronique des caractéristiques et des résultats de tests de capteurs du SPF est un outil étonnant de transfert de connaissances pour accéder rapidement à l'information et comparer des solutions de captage.

b) Composants

Les principaux résultats obtenus en 2000 au **SPF-HS Rapperswil** sont les suivants [1] :

- L'installation de transmission de mesures sur le toit du SPF par bus informatique a été rénovée et le logiciel de pilotage modifié.
- Un appareil de calibrage des débit-mètres par la méthode du piston a été imaginé, construit et mis en service.
- L'accréditation EN 45001 a été en principe obtenue pour le test des capteurs, ce qui suppose précision et reproductibilité des mesures et description précise de toutes les procédures. En principe, car l'envoyé de l'organisme SAS est extrêmement tatillon et paraît hésiter encore...
- 33 capteurs ont été testés au banc du SPF. La demande de tests est en sensible diminution dans toute l'Europe pour plusieurs raisons : stabilisa-

tion des parts de marché de chaque fabricant, coût élevé des tests et de l'innovation pour les fabricants. Un ralentissement est à prévoir suite au coup d'arrêt aux aides lors du vote suisse du 24 septembre. Il est à noter que les fabricants de capteurs font tester leur capteur dans plusieurs instituts en Europe et ne montrent que le meilleur des résultats. Cela rend nécessaire la coordination entre les instituts, la standardisation des procédures et les contrôles de qualité des laboratoires au travers des accréditations malheureusement coûteuses.

- La mesure de l'effet de l'angle d'incidence du rayonnement sur les performances (« *IAM ou Incident Angle Modifier* ») a été mieux définie pour les absorbeurs solaires non-couverts. En particulier, l'effet de l'inclinaison du capteur joue un rôle important pour ce type de capteur soumis à la convection naturelle. La recherche a porté sur des angles de 5 à 30 degrés, avec ou sans vent

forcé sur l'absorbeur. Il a été trouvé que, pour les cas sans vent, une régression quadratique est la plus précise, alors que, pour les cas avec vent, une droite suffit pour caractériser le capteur. Un terme quadratique dépendant du vent doit donc être introduit pour les absorbeurs non couverts. De plus, aucun effet des pertes par rayonnement sur l'IAM n'a pu être mis en évidence. Enfin, la méthode stationnaire de mesure ne s'applique que pour les cas où le rayonnement solaire incident dépasse 700 W / m^2 .

- Les tests de qualité ont été menés sur 22 capteurs, ce qui est une réussite, compte tenu de la complexité du test et de la météo favorable nécessaire à ceux-ci. Les capteurs s'améliorent d'année en année, les températures de stagnation augmentent fortement, pouvant dépasser $230 \text{ }^\circ\text{C}$ pour les meilleurs, et condamnent les absorbeurs à peinture sélective qui ne résistent pas à de telles températures. Le label de qualité est un élément important de sécurisation des consommateurs et l'effort doit être poursuivi pour que les fabricants l'acceptent sans réticence.
- Les travaux du comité technique de normalisation européenne TC312 ont abouti à une nouvelle norme pour les tests de capteurs, mais la procédure d'acceptation par tous les pays sera encore longue. La normalisation est consommatrice de ressources, mais est nécessaire si l'on veut éviter de marginaliser les tests suisses.

En ce qui concerne le stock solaire étudié comme composant, nous avons engagé en 1998 un programme de recherche avec le Danemark et les Pays-Bas visant à mieux comprendre le fonctionnement interne d'un stock stratifié au moyen de la simulation dynamique du fluide. Faute de moyens financiers en 2000, nous avons dû mettre cette activité en attente.

Dans le domaine des matériaux, les travaux et résultats du SPF ont été en 2000 les suivants [1C] :

- La nouvelle Tâche AIE 27 « *Performance of Solar Façade Components* » a débuté. Elle est organisée en trois sous-tâches : performance, longévité et développement durable. Le SPF dirige la sous-tâche longévité et participe aux travaux du groupe « *Solar Façade Absorbers* ». Des résultats sont attendus en 2001 et surtout en 2002.
- Un nouveau banc test de couverture transparente pour le solaire thermique et le photovoltaïque a été réalisé. L'IAM des échantillons de verre solaire a été mesuré avant exposition aux intempéries avec précision sur toute la gamme des angles d'incidence au banc d'essai optique du SPF réalisé en 1999.
- L'analyse de la stabilité de fluides caloporteurs jusqu'à $280 \text{ }^\circ\text{C}$ a été poursuivie en collaboration avec l'EMPA, la méthode et l'appareillage étant désormais au point. Des résultats très nouveaux ont été publiés en masquant les noms de marque des produits évalués. Les caloporteurs qui subissent la stagnation sont dangereux pour

l'aluminium et le zinc. La reproductibilité des résultats est cependant insuffisante. Cette recherche doit être poursuivie, car elle est la base de la longévité du circuit solaire.

- La recherche sur les caractéristiques des verres solaires a montré que la transmission solaire des verres recouverts d'une couche anti-reflet (AR) atteignait une valeur de 0.958 contre 0.902 pour le verre solaire usuel.
- La simulation au moyen d'un logiciel acquis l'an dernier a montré que le verre non-structuré présente le meilleur IAM. Un verre hybride semble être le meilleur compromis pour réduire les surchauffes estivales en fin de journée à faible incidence, tout en gardant une performance hivernale de qualité.
- Le vieillissement des appareils de mesure (laser et spectromètre FTIR) a perturbé les mesures durant l'année. Un remplacement est à envisager.
- L'étude des dépôts calcaires dans les échangeurs solaires a débuté par la mise au point d'un cas de référence. En 1'000 heures, un échangeur à plaques de 5 kW, soumis à une eau de $98 \text{ }^\circ\text{C}$ et d'une dureté de 30 degrés français, a été complètement entartré. Un système de traitement anti-calcaire de l'eau par champ magnétique a permis, après réglage adaptatif, de pallier ce problème. Les résultats seront publiés prochainement.
- Après un accord avec l'industriel allemand qui exploite le brevet « *Absorber 2000* », l'optimisation du procédé de production en continu a été conduite. Il est désormais possible de produire une tôle de cuivre de 80 cm de large, homogène en qualité sélective (absorption 92.3%, émission entre 3 et 6.7%). Il est encore possible de faire mieux.

Le SPF avait mis au point en 1999 un **banc d'essai des stocks solaires** de 1 à 25 m^3 . En 2000, ce banc a été étendu aux systèmes solaires combinés qui sont étudiés dans la Tâche AIE 26.

c) *Systèmes*

Les tests de kits solaires au SPF ont été maintenus pour satisfaire la demande de 4 systèmes du marché, dont le nouveau *Solkït*, repris par un constructeur suisse, suite à la faillite du précédent. Le maintien du banc d'essai est à décider en 2001. Une enquête auprès des constructeurs a montré que les systèmes du marché diffèrent de plus en plus des systèmes réellement testés dans les années précédentes au SPF et qui ont obtenu le label. Cela est dû à l'innovation que l'on ne peut arrêter, bien sûr, à la recherche de simplification pour réduire les prix de vente et au coût du test pour les fabricants. Le danger est le glissement progressif vers des installations de moindre qualité qui feraient perdre la confiance dans le solaire si durablement acquise ces dernières années.

Les tests de systèmes du SPF se sont orientés vers les **systèmes combinés** pour aider à satisfaire la tendance

du marché à aller vers ces systèmes. La Tâche AIE 26 « *Solar combisystems* » que nous avons initiée en 1999, s'occupe de comparer et d'optimiser 15 systèmes en Europe proposés par l'industrie. La définition des séquences de test a été un des gros travaux de l'année 2000 dans l'une des sous-tâches. Dans ce domaine, tout est à faire ! La proposition d'un test en 6 jours du SERC suédois semble être la plus adaptée et sera acceptée pour les tests de 2001 [1B].

La sous-tâche A de la Tâche AIE 26 dirigée par la Suisse (J.-M. Suter) a atteint son premier objectif en réussissant la publication d'une brochure de présentation comparative des systèmes actuels « *Solar combisystems in Austria, Denmark, Finland, France, Germany, Sweden, Switzerland, the Netherlands and the USA* », disponible auprès d'ENET :

(<http://www.energyresearch.ch/>). Le travail de collaboration, piloté par le Büro n+1 de Berne et Suter Consulting, a été reconnu comme une réussite par la communauté solaire internationale réunie à *Eurosun 2000*. La description comparée a permis de mettre au point une classification des systèmes qui sera reprise par la normalisation européenne. Deux séminaires avec participation industrielle ont été réalisés en Finlande et en Suède sur les thèmes de la stagnation estivale dans les systèmes combinés et la liaison avec un chauffage à distance comme appoint. Des critères de comparaison des installations combinées ont été définis. Une « *Industry Newsletter* » a été réalisée. La Tâche a du retard, compte tenu des ambitions et de la maladie d'un des dirigeants de sous-tâche. Le comité exécutif de l'AIE a accepté une prolongation d'un an [5].

Une collaboration entre l'Institut d'automatique de l'EPF-Lausanne et l'École d'Ingénieurs du Canton de Vaud à Yverdon a été instaurée pour poursuivre les travaux communs **d'optimisation de systèmes combinés**, en relation avec la Tâche AIE 26. Une installation complète de 12 m² de capteurs pour une villa familiale a été mesurée *in situ* par l'équipe d'Yverdon et un modèle TRNSYS a été développé grâce à la Tâche AIE 26 et validé sur ces mesures. Le taux de couverture solaire annuel a été de l'ordre de 18 à 20%, valeur décevante, le bâtiment étant beaucoup moins étanche à l'air que prévu (demande énergétique de 100 kWh / m² · an mesurés contre 55 escomptés). La productivité des capteurs a atteint une valeur acceptable de 340 kWh / m² · an. Le travail de simulation est d'ampleur, car il y a, d'une part, un stock stratifié avec échangeur et boiler intégré (aucun modèle n'existait) et, d'autre part, une très forte interaction dynamique avec le comportement thermique du bâtiment que le système chauffe, nécessitant un modèle précis. Les améliorations de la cuve de stockage proposées en 1999 ont été réalisées sur l'installation complète disponible au laboratoire d'Yverdon. Les paramètres du stock ont été identifiés et la recherche d'un système optimal a pu être faite. L'optimisation réalisée en simulation permettrait de réaliser 10 à 12% d'économie de mazout ou de gaz par rapport au système d'origine, sans surcoût notable. Cette optimisation théorique sera testée en laboratoire en 2001.

La mise en œuvre d'une stratégie de commande avancée, développée par l'institut d'automatique de l'EPF-Lausanne, permettrait de diminuer encore la demande d'appoint fossile. La stratégie de commande est du type prédictif et fait appel aux prévisions météorologiques fournies via Internet automatiquement au PC de commande par l'Institut suisse de Météorologie.

L'algorithme de commande, basé sur la technique dite « *Interactive Learning* », a été mis au point et testé sur des séquences météorologiques et de consommation. Il s'agit d'un thème de recherche prometteur dans lequel la Suisse a une très large avance, et qui devrait déboucher sur des innovations intéressantes dans le réglage des installations thermiques en général [2].

En matière de systèmes, nous poursuivons dans la voie amorcée il y a plusieurs années de développer les éléments d'une centrale solaire thermique capable de produire de l'électricité à faible coût. Le projet de **centrale pilote électro-thermo-solaire de 10 kW_{el} SPS (Solar Power System)**, né de l'association de la société COGENER et du LENI de l'EPF-Lausanne, a avancé d'un grand pas durant l'année 2000. Le prototype installé sur le site de l'EPF-Lausanne a produit son premier kWh solaire en novembre 2000 !



Le concentrateur extra plat de Cogener du projet SPS

La centrale construite comprend deux cycles de Rankine Organique (ORC) à *expanders scroll* superposés et un moteur à cogénération de 12 kW_{el}. Le solaire vient économiser l'appoint du moteur, permettant ainsi d'avoir une solution pouvant produire jour et nuit à puissance constante. L'année 2000 a permis la mise au point des composants de la centrale et de l'unité de production d'électricité, ce qui n'est pas aisé pour un système complexe. Le couplage entre le moteur et les cycles de Rankine a été réalisé en laboratoire à satisfaction, malgré un nombre important de problèmes et imprévus. Un retard de deux mois dans la mise en place des éléments du capteur solaire, suite à des imprévus, n'a pas permis un couplage avant le début de l'été, malgré un suivi très serré du projet. Des jours ensoleillés de novembre ont cependant permis de montrer que le prototype fonctionne. Le rendement de captage du capteur à concentration a atteint 53% à 135 °C. Le rendement optique est de l'ordre de 55 à

60%, ce qui devrait pouvoir être amélioré, et le coefficient de pertes est de l'ordre de $0.3 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$, ce qui est déjà très bon. Les données récoltées sur le couplage sont trop peu abondantes pour pouvoir tirer tous les enseignements nécessaires. Nous savons que le capteur peut produire la température souhaitée de $150 \text{ }^\circ\text{C}$, que l'unité ORC est stable et que les transitoires ne posent pas de problèmes. Un été de mesures complémentaires sera nécessaire.

Les éléments supports des lamelles de miroir du capteur à concentration ont été modifiés pour pallier aux problèmes de dilatation du support en EPDM utilisé l'an passé. Une deuxième ligne de capteurs a été conçue et construite de manière à atteindre la puissance nécessaire à la turbine. Parallèlement à ces travaux, le cycle ORC à deux étages a été testé abondamment au Laboratoire du LENI avec un très bon résultat de 14% d'efficacité pour une température de source chaude de $165 \text{ }^\circ\text{C}$.

Le budget de ce projet est malheureusement faible alors que des enseignements concernant les capteurs à concentration et les cycles de Rankine ont des applications également hors de la production d'électricité [4].

d) Installation

La cité solaire de **Plan-les-Ouates** comporte une toiture solaire intégrée de $1'400 \text{ m}^2$ d'absorbeurs sélectifs couplés à 100 m^3 de stock. Le suivi de la toiture solaire est effectué par le CUEPE depuis juin 1997 et aurait dû être terminé en 2000. Un nouveau bâtiment ayant été construit derrière l'ensemble existant, la question de son alimentation par le solaire a été posée

par le maître d'ouvrage. L'année 2000 a donc été consacrée à la mise en service et à l'optimisation du système pour fournir de la chaleur solaire excédentaire en été à l'eau sanitaire du nouveau bâtiment, ce qui a permis de réduire de $10 \text{ MJ} / \text{m}^2 \cdot \text{an}$ l'indice énergétique de l'ensemble et de mieux utiliser la toiture solaire.



La cité solaire de Plan-les-Ouates et sa toiture d'absorbeurs.

Une collaboration avec le Portugal concernant ce projet pourrait permettre une exportation du concept de toiture solaire dans ce pays. Le projet de recherche aura alors joué un rôle scientifique et de soutien à l'industrie solaire suisse. Le rapport final a été repoussé à 2001 [3].

Coordination et collaboration nationale

Les principales collaborations nationales de 2000 ont été :

- le SPF avec la plupart des fabricants ou distributeurs de capteurs solaires et d'installations combinées en Suisse, et avec le LFEM/EMPA,
- l'École d'Ingénieurs d'Yverdon, avec l'Institut d'automatique de l'EPF-Lausanne, et l'industriel AGENA,
- le LENI de l'EPF-Lausanne avec COGENER et divers fournisseurs locaux,
- le CUEPE avec l'industriel Énergie Solaire SA.

Comme chaque année, le SPF a organisé de nombreuses visites de ses installations de Rapperswil pour des

étudiants, des écoles ou des groupes professionnels, ainsi que des séminaires thématiques pour l'industrie solaire. L'écoute des industriels du solaire est également une occupation que nous menons par la biais des associations professionnelles SOFAS et PROMES.

La coordination avec le programme solaire P+D est assurée par le responsable du domaine "Énergie solaire" de l'OFEN, et les contacts fréquents entre chefs de programme ont lieu par téléphone ou par e-mail.

La coordination entre les programmes de recherche est assurée par des contacts périodiques entre chefs de programme.

Coordination et collaboration internationale

Dans le cadre du programme « *Solar Heating and Cooling* » de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie), deux axes de recherche sont en cours :

- Le SPF travaille dans la Tâche AIE 27 « *Solar*

Facades » qui a débuté en 2000.

- Le SPF et l'EIVD, associée à l'Institut d'automatique de l'EPF-Lausanne, travaillent dans la Tâche AIE 26 « *Solar Combisystems* » qui a débuté

en fin 1998, ainsi que le Büro n+1 de Berne, travail repris en juillet par le bureau Suter Consulting.

La collaboration internationale se manifeste également dans les conférences scientifiques de grande ampleur, telle *Eurosun 2000* qui a eu lieu en juin au Danemark avec plus de 400 participants. Les apports du SPF à *Eurosun* ont été relevés. Des conférences annuelles telles que « OTTI » en Allemagne et celles de Gleisdorf en Autriche sont aussi le lieu privilégié d'échanges d'idées et de résultats, et de veille technologique. Il est important que les chercheurs puis-

sent y participer en présentant leurs travaux.

Les instituts de recherche de notre programme maintiennent des liens étroits avec l'Europe au travers des comités de normalisation et grâce au programme de l'AIE.

Faute de moyens, nous avons dû cependant renoncer à développer des opportunités de collaboration ouvertes les années précédentes, comme, par exemple, avec le Danemark et les Pays-Bas en matière de compréhension des phénomènes de stratification dans les stocks solaires.

Transferts à la pratique, Projets P+D

La recherche en énergie solaire thermique est une recherche appliquée qui vise à offrir un soutien à l'industrie solaire, à permettre d'avoir confiance dans le solaire thermique et à diminuer ses coûts spécifiques. Grâce aux actions d'information (CD-ROM), aux outils logiciels (Polysun), aux visites et articles, le SPF essaie de transférer le plus rapidement possible son savoir acquis grâce aux mesures, à la simulation et à la confrontation internationale au marché suisse. Les kits solaires pour l'eau chaude sanitaire sont désormais bien connus.

En ce qui concerne le programme P+D, dirigé par le bureau PLANAIR, le nombre de demandes de soutien au titre de projets P+D a nettement augmenté en 2000, grâce au projet *Jugend-SolarProjekt* (22 demandes): http://www.infoenergie.ch/P_D/FP_Df.htm

Les projets acceptés en 2000 [6] s'orientent sur 3 axes :

- promotion de l'énergie solaire auprès de groupes de jeunes qui pratiquent l'autoconstruction de capteurs et d'installations. Cette démarche a été honorée par le *Prix Solar 91*,

- poursuite du soutien en milieu hôtelier et locatif, y compris le « *contracting* » solaire,
- soutien aux installations pilotes destinées à tester des appareils de contrôle continu du fonctionnement ou l'application de principes connus (par exemple, *Drain-back*) sur de grands projets.

En 2001, l'effort de promotion au niveau fédéral sera rendu difficile par le vote négatif du 24 septembre 2000.

Une analyse globale des actions P+D menée jusqu'à ce jour est en cours de réalisation. Elle permettra de re-définir les proportions d'objectifs prioritaires pour les années à venir.

Selon les statistiques de la SOFAS 1999, le marché du solaire thermique a régressé en volume (26'000 m² de capteurs vitrés vendus en Suisse contre 33'200 m² en 1998, et 26'731 en 1997). 14'096 m² de non-vitrés en 1999, contre 20'951 en 1998 et 15'486 en 1997). À fin 99, il y avait 738'000 m² de capteurs installés en Suisse. Le marché a régressé notablement en valeur passant de 76.4 MCHF en 1998 à 59.6 MCHF en 1999.

Évaluation 2000

Le programme 2000 s'est inscrit dans la continuité des travaux correspondant au plan directeur 2000-2003 du programme. Les trois pôles de compétence (SPF pour les tests, les matériaux et composants et les systèmes combinés, Yverdon-Lausanne pour le réglage optimal et Lausanne pour le solaire à concentration) ont travaillé au mieux de leur capacité. Le recrutement est cependant difficile. Il y a pénurie de personnes connaissant l'informatique désireuses de travailler dans l'ingénierie et la thermique, vu l'attractivité du secteur Internet.

Dans le projet SPS, nous espérons avoir plus de résultats concernant le couplage solaire – ORC. Les budgets limités en début d'année, les délais très serrés et les retards de livraison des pièces de la ligne n° 2 par les fournisseurs n'ont pas permis d'être opération-

nel avant l'été et son soleil. Une première réussite est cependant à relever.

Mais la source première des difficultés reste le manque de moyens pour réaliser tous nos objectifs. Le budget 2000 a été encore diminué de 10% par rapport à 1999 et nous ne pouvons plus faire une recherche de découverte, faite d'essais et d'hésitation, avec les moyens à disposition. Les pas sont petits, orientés et concernent surtout des améliorations.

Le transfert à la pratique des résultats de la recherche thermique à basse température est satisfaisant, nos projets faisant appel à la participation d'industriels du solaire. Le marché solaire est en stagnation et la recherche va s'en ressentir.

Perspectives 2001

En 2001, nous devons encore revoir à la baisse nos objectifs, faute de moyens financiers suffisants.

La qualité des installations de mesure du SPF pourrait être touchée, sans doute également le nombre de tests, dicté aussi par une faiblesse du marché solaire. Les développements de POLYSUN pourraient être mis en attente.

Les ouvertures de projets européens de recherche en matière de solaire actif sont malheureusement très limitées depuis plusieurs années, comme si l'Europe estimait que le solaire thermique était connu. En fait, il reste des progrès à faire pour rendre durables et efficaces les installations solaires, et pour conquérir la confiance de la grande masse des consommateurs de chaleur à basse température.

Le projet SPS pourrait également souffrir d'un manque de financement. Les contrats ne sont pas encore signés. Cette perte de savoir-faire et d'équipes, alors

que le projet n'est pas transférable en l'état, serait néfaste pour l'image de la recherche solaire en Suisse.

Nous continuerons à concentrer les moyens sur les deux centres de compétences que sont le SPF-Rapperswil et l'EIVD-Yverdon, alliée à l'Institut d'automatique de l'EPF-Lausanne.

Nous garderons l'axe de recherche sur le contrôle optimal dans les installations solaires thermiques : il est porteur d'innovation au niveau mondial.

Nous encouragerons l'implication des groupes dans les Tâches de l'AIE pour bénéficier de l'effet de groupe. En période de récession, il faut se concentrer sur des pôles et se regrouper.

Les pôles sont ceux demandés par notre marché national : des installations solaires combinées fiables, compactes et efficaces.

Liste des projets de recherche

Légende : (RA) Rapport annuel disponible
(RF) Rapport final disponible (pas de rapport annuel dans l'année)

- [1] U. Frei et al., SPF/HS-Rapperswil : *SPF Forschung 1997 – 2001 ♦ Teil A : Komponenten in solarthermischen Systemen* (RA) ♦ *Teil A: Komponenten in solarthermischen Systemen, Speicher* (RA) ♦ *Teil B : Thermische Solarsysteme* (RA) ♦ *Teil C : Materialien in thermischen Systemen* (RA) ♦ *Teil D : Informatik und Software* (RA) <http://www.solarenergy.ch/>
- [2] T. Prud'homme, A. Gherbi, O. Renoult, J. Bony, D. Gillet, Ph. Dind, Institut d'automatique EPF-Lausanne et Laboratoire d'énergétique solaire de l'EIVD Yverdon : *Optimisation d'installations solaires combinées* (RA) <http://iawww.epfl.ch>, <http://www.eivd.ch>, <http://iawww2.epfl.ch>, <http://solarplant.eivd.ch>
- [3] B. Lachal, CUEPE, Genève : *Toiture solaire de Plan-les-Ouates : mesures, bilan technico-économique et étude de son intégration architecturale* (RA, RF repoussé à 2001) <http://www.unige.ch/cuepe/>
- [4] M. Kane, D. Larrain, D. Favrat, LENI/EPF-Lausanne, Y. Allani, C. Pécoud, J.-S. Thély COGENER, Lausanne : *SPS : mini-centrale pilote électro-thermo-solaire de 10 kWel Phase 2b* (RF à paraître en 2001) ♦ *SPS : Améliorations de la première ligne et construction de la ligne n° 2 du CEP concentrateur extra-plat* (RF Novembre 2000)
- [5] J.-M. Suter, Büro n+1, Suter Consulting, Berne : *IEA SH&C Task 26 Solarcombisystems – Leading of Subtask A* (RA) <http://www.iea-shc.org/>, <http://www.energyresearch.ch/>

Liste des projets P+D

- [6] PLANAIR, *La Sagne : Programme Solaire actif P+D, Rapport annuel 2000*, OFEN
Extrait de la liste de nouveaux projets en 2000 :

N° 5448 ROBINSON Club Schweizerhof, 7552 Vulpera	72 m ²
N° 6349 SPS : Ligne n° 2 de Capteurs solaires à concentration - Lausanne	60 m ²
N° 6388 SOLARANLAGE HASCHIVENU CAMPO RASA - 6655 Intragna	10.5 m ²
N° 77245 AUTOWASCHANLAGE (SOLARCONTRACTING) - 1762 Givisiez	16 m ²
N° 77246 MFH HEINIMOOSSTRASSE SOLARCONTRACTING - 5734 Reinach	26 m ²
N° 77247 ACCADUEO CH – 4437 Waldenburg	30 m ²

Pour accéder aux fiches de bons exemples : http://www.infoenergie.ch/P_D/F_Pberif.htm
Et à partir de mai 2001 : <http://www.solarch.ch/>

STOCKAGE DE CHALEUR

Rapport de synthèse
sur les activités 2000 du programme de recherche

Jean-Christophe Hadorn

jchadorn@swissonline.ch



Stockage à haute densité

Modèle réduit de cuve pour l'étude du comportement de matériaux de stockage de chaleur à forte densité thermique en laboratoire (Photo SPF, Rapperswil)

Centres de gravité du programme

Le programme « Stockage de chaleur » s'est concentré sur les axes principaux suivants en 2000 :

1. Début de recherche de **solutions de stockage de chaleur à haute densité** dans le but de diminuer le volume de stockage nécessaire pour atteindre des parts solaires élevées dans les installations adaptées aux villas individuelles, segment de marché actuellement le plus porteur.
2. Recherche de **solutions optimales pour le stockage diffusif de chaleur par sondes**, en recourant à la simulation des installations qui ont été mesurées durant les années précédentes. Ce type de stockage consiste à chauffer un volume

de sol grâce à un échangeur souterrain constitué de sondes de 30 à 200 m de profondeur, espacées de 2 à 6 m. La technique de chaque sonde est la même que celle utilisée pour les pompes à chaleur sur sonde de villa.

3. Analyse de la possibilité de recourir à la **dalle d'un bâtiment pour seul stockage de chaleur solaire**, dans le but de réaliser des installations solaires à investissement réduit. La source de chaleur peut être soit des capteurs vitrés, soit des absorbeurs non-vitrés.

Buts visés pour 2000

a) Stockage en cuve à eau et en bâtiment

Le banc d'essai des cuves solaires devait être opérationnel au SPF à Rapperswil

Les limites du concept de capteurs solaires couplés à une dalle active (type plancher solaire direct, sans cuve de stockage) quant aux apports solaires possibles devaient être trouvées.

b) Stockage diffusif

Entre 1996 et 1999, un projet mené par le ZHW Winterthur nous avait montré comment construire une installation solaire avec stockage saisonnier diffusif optimal. La recherche de maîtres d'ouvrage désireux de construire un système pilote d'envergure devait débiter pour une période de 2 ans.

Le rapport final de quatre années de mesures du Collège de Pesieux équipé d'un stock diffusif de 23'000 m³ était attendu.

Le démarrage du complexe de bâtiment de la SUVA à Root près de Lucerne avec un stock saisonnier de chaleur était attendu.

La mesure d'une installation de puits canadien à Satigny près de Genève devait débiter pour un an.

c) Stockage en aquifère

La thèse de M. Dupasquier sur les conditions d'exploitation et géologiques propices au stockage de chaleur à 30-100 °C devait être soutenue et publiée.

d) Stockage en nouveau matériau

La caractérisation de nouveaux matériaux pour le stockage court terme de l'énergie solaire thermique, comme la zéolithe, devait débiter en laboratoire au SPF, pour améliorer nos connaissances sur ce matériau, et le *design* de deux montages de laboratoire devait être fait.

Travaux effectués et résultats obtenus

a) Stockage en cuve et dans le bâtiment

Le banc d'essai des stocks stratifiés de 1 à 25 m³ pour les installations solaires domestiques a été intégré dans un banc pour les systèmes combinés, et sera opérationnel en 2001 (cf. le rapport sur le programme « Solaire actif : chaleur »).

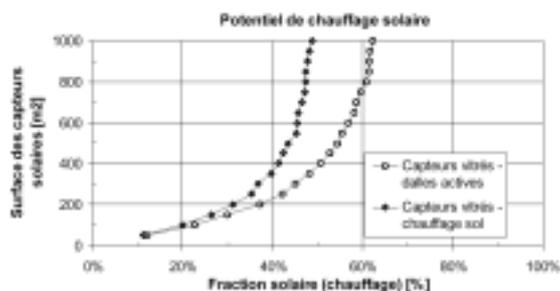
L'étude de la possibilité de stocker la chaleur solaire dans la dalle d'un bâtiment locatif de 2 fois 20 logements à Renens a été accomplie par le LASSEN de l'EPFL et le LEEF du SUPSI au Tessin. Le concept du système repose sur le principe de la dalle active, développé par C. Cornu chez GEILINGER SA en 1995. Un modèle complet a été développé en TRNSYS dans un précédent projet qui concernait une villa, et a été amélioré pour cette étude. Les conclusions principales sont les suivantes [9, voir aussi 8 qui

est un projet connexe]:

- L'immeuble au standard Minergie a une demande en chauffage de 30 kWh / m² · an, et la puissance de chauffage nécessaire est de 20 W / m² de dalles, qui couvrent 75% de la surface de référence énergétique.
- Le potentiel de chauffage solaire actif est plus grand avec un chauffage par dalles actives qu'avec un chauffage par le sol lorsque les capteurs sont couplés directement à la distribution, sans stock intermédiaire. La fraction solaire de chauffage peut atteindre 50%.
- Il est recommandé de n'utiliser qu'un seul champ de capteurs solaires pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage, et non pas, par exemple, des cap-

teurs solaires vitrés pour l'eau chaude et des non vitrés pour le chauffage.

- Les capteurs plans vitrés doivent être préférés si l'on veut atteindre une fraction solaire dépassant 30% de l'ensemble des besoins.
- Pour une fraction solaire globale inférieure à 25%, il est préférable de se contenter de satisfaire les besoins en eau chaude sanitaire, avec pour règle 1 m² de capteur vitré par occupant et un stock de 20 l / m² de capteur.
- On peut atteindre 40% solaire (globalement pour l'eau chaude et le chauffage) avec 7 m² de capteurs par 100 m² de surface de référence énergétique (SRE), pour environ 50 CHF par m² de SRE.



Stockage en dalle active ou chauffage de sol dans un groupe de 10 immeubles ? Le chauffage de sol limite la part solaire à 45% par manque de capacité de stockage court terme (il n'y a pas de cuve à eau dans le système).

- Un stockage diffusif central n'est envisageable que si la demande en chaleur atteint 1'500 MWh / an, soit 10 immeubles et non 2, pour une fraction solaire de 50 à 80% sans surcoût trop élevé : 80% solaire sont atteints avec un investissement de 100 CHF par m² de SRE. Le stock doit avoir un volume de 10 m³ par m² de capteur solaire dans les conditions géologiques classiques de la Suisse, mais sans écoulement d'eau souterraine. L'espacement optimal des sondes doit être de 2 m dans le cas de la distribution par dalle active, alors que si l'on travaille avec un stock tampon, sous forme de cuve à eau et une distribution par chauffage de sol, l'espacement optimal est de 2.4 m.

Les bâtiments ont été construits en 1999-2000 avec des dalles actives, mais le maître d'ouvrage a opté pour une solution sans solaire pour limiter son prix de location à 190 CHF par m² de plancher.

Les conclusions de cette étude devraient faire l'objet d'une publication internationale.

Ces conclusions sont relayées par une étude du même auteur principal (D. Pahud) concernant une villa solaire au Tessin où nous suggérons au propriétaire une solution avec dalle active. Les conclusions sont les suivantes :

- La surface de dalle active est de 160 m² pour une surface de référence énergétique de 240 m², ce qui induit une puissance de chauffage de

30 W / m² de dalle pour cette maison au standard Minergie.

- Avec 15 m² de capteurs vitrés, l'économie d'énergie d'appoint au Tessin est de 60% pour l'eau chaude et 40% pour le chauffage, ce qui permet à la villa d'atteindre le standard Minergie de 45 kWh / m² · an !
- Augmenter la surface de capteurs solaires est préférable à augmenter la surface de fenêtres au sud ! Règle : 5 m² de capteurs font mieux que 25 m² de fenêtres.
- La surface des dalles actives n'est pas à dimensionner en fonction des apports solaires, mais bien des besoins en chauffage.
- Un m² de capteurs vitrés équivaut à 2 m² d'absorbeurs non-vitrés dans la gamme 10 à 20 m², dans un climat sans vent. Les absorbeurs peuvent cependant être intégrés en toiture et ne posent pas de problème de surchauffe en été.

L'autonomie solaire même au Tessin ne peut être atteinte sans un stock complémentaire, qui pourrait, par exemple, être quelques m³ de matériau à haute densité de stockage !

L'installation solaire RENOVA de Chambésy, décrite dans notre rapport 1999, a livré tous les enseignements possibles grâce aux mesures du CUEPE (Université de Genève). Le gaz n'a pas été utilisé durant les deux années de suivi. Seul un stère de bois a été utilisé en appoint ! L'installation est un exemple phare de ce que l'on peut faire d'une rénovation avec gains passifs et solaire actif poussé. Le propriétaire a fait œuvre de pionnier pour la connaissance scientifique et, à ce titre, doit être salué [2].

b) Stockage diffusif

À l'École d'Ingénieurs de Winterthur (ZHW), le projet de recherche sur les conditions optimales du **stockage souterrain diffusif** pour des bâtiments de 100 logements dans la région de Zürich s'est terminé en 1999. Pour convaincre des maîtres d'ouvrage et des architectes, la suite du projet consiste à définir une méthode de financement des investissements dans le solaire et le stockage (environ 2 MCHF), à aller exposer le concept et à faire connaître sa faisabilité qui a été démontrée en Allemagne. Ce projet « d'acquisition » a débuté en 2000 après un retard administratif. Les travaux ont débuté par la définition de personnes et organismes cibles, l'étude des conditions de réussite du projet Neckarsulm en Allemagne similaire au système que nous visons pour la Suisse, et l'identification des lieux géologiquement favorables. Des travaux de diplôme ont également permis de préciser encore des composants techniques comme le stock tampon en plastique. Une documentation pour le maître d'ouvrage est en préparation pour les démarches de 2001 [3].

Le projet **SERVO** consiste à dégivrer en hiver la chaussée d'un pont d'autoroute à Därlingen grâce à la chaleur accumulée dans un stock diffusif de

30'000 m³, chargé en été par un collecteur de 200 m² situé dans la chaussée. Le rapport final a été publié en 1999. Nous utilisons désormais les mesures pour caler un modèle de simulation afin d'effectuer des analyses de sensibilité dans le but d'optimiser de telles installations en réduisant les coûts et de fournir des règles de dimensionnement. L'étude a pris du retard suite au départ du chercheur principal pour le Tessin [6].

De même, l'exploitation des deux années de mesures de Wollerau (stock diffusif de 32 sondes de 125 m de profondeur pour un bâtiment industriel) par simulation a subi le même retard. Les mesures ont été rassemblées et analysées mais le modèle n'a pu être élaboré faute de temps [5].

Pour ces deux projets de recherche une prolongation motivée a été acceptée par l'OFEN.

c) Stockage en aquifère

La thèse de M. Dupasquier sur la **faisabilité générale du stockage de chaleur en aquifère**, du Laboratoire de Géologie de l'EPF-LAUSANNE a été soutenue et acceptée par le jury international (Parriaux, Favrat, Iris, Sanner, Willemsen, Perrochet, Hadorn). Le document ne sera publiquement disponible qu'en 2001. De nouvelles hypothèses ont été avancées pour expliquer les phénomènes de ruine des stocks en aquifère de volume inférieur à 20'000 m³. L'auteur montre également la séparation des domaines où règnent les pertes conductives et celui où débutent les pertes convectives. Les conclusions sont défavorables

au stockage en aquifère à plus de 30 °C à petite échelle, et nous avons abandonné le soutien à cette voie [4].

d) Nouveaux matériaux de stockage thermique

Nous avons entrepris au SPF de Rapperswil, centre de recherche solaire suisse, d'essayer de réaliser un stock solaire à haute densité (3 à 4 fois celle de l'eau) pour réduire les volumes de stockage saisonnier et absorber les surchauffes estivales des capteurs de qualité allant s'améliorer. La **zéolithe** est un matériau candidat. Il s'agit d'un silicate d'alumine à grande surface spécifique, qui absorbe de la chaleur lors de désorption de vapeur d'eau à 120 °C environ. La décharge a lieu par réabsorption de la vapeur d'eau. Le **silicagel** pourrait aussi être considéré.

Le SPF a commencé par caractériser le matériau dans un rapport final, après une phase de recherche de références bibliographiques et de rencontre de chercheurs en Bavière, puis a construit deux bancs d'essai de taille réduite en laboratoire. Le but est de pouvoir choisir entre un système ouvert et un système fermé, avant de passer à une taille plus grande. Dans le système ouvert, c'est l'air qui est le caloporteur et est chauffé jusqu'à 20 °C et la vapeur d'eau le matériau de stockage.

Les premiers résultats concernent l'absorption d'humidité ambiante du matériau et les solutions techniques apportées pour la construction de l'appareillage. Les mesures à haute température débiteront en février 2001 [1].

Coordination et collaboration nationale

La coordination avec les programmes "Géothermie" et "Chaleur de l'environnement" est régulière.

La collaboration entre instituts de recherche est encouragée, notamment entre le ZHW et le SPF pour la définition des meilleurs schémas hydrauliques pour les installations solaires avec stockage saisonnier de

chaleur par multi-sondes. Une collaboration avec le LEEE (D. Pahud) est également favorisée dans ce projet, de telle sorte que nous ayons nos trois pôles de compétence travaillant en complément : systèmes par le ZHW, circuit solaire et choix des matériaux par le SPF, et simulation et dimensionnement par le LEEE.

Coordination et collaboration internationale

Durant l'année 2000 a eu lieu à Stuttgart la conférence triennale *Terrastock 2000*. Ce fut la principale occasion de coordination internationale et de mise en place de collaboration.

Un résumé des discussions et des papiers présentés à *Terrastock 2000* peut être trouvé dans notre rapport annuel complet ou sur internet en 2001 (www.solarch.ch). La recherche suisse en matière de stockage n'est pas à la pointe, faute de moyens. Le Japon a fait une impression de volonté d'aboutir à de nouvelles solutions dans le domaine des stocks de chaleur à court terme, et l'Allemagne dans le domaine des stocks saisonniers diffusifs.

Nous espérons pouvoir accueillir une conférence internationale de type *Terrastock* en 2006 ; nous n'avons pas pu présenter la candidature de la Suisse pour 2003 faute de ressources et de relais d'une grande École disposant de l'infrastructure nécessaire.

Nous avons défini à l'occasion de *Terrastock 2000*, comme nous le projetions en 1999, les contours d'une nouvelle tâche AIE avec un collègue des Pays-Bas. Cette tâche devrait s'intéresser aux matériaux de stockage, tels que la zéolithe et les silicagels. Un intérêt de plusieurs pays a été manifesté et nous voyons dans une telle collaboration internationale la possibilité d'aboutir plus vite. Les démarches sont en cours pour organiser un premier séminaire en 2001

consacré à la présentation de l'état de l'art du stockage en zéolithe ou silicagel dans chaque pays.

Toujours dans l'AIE, nous suivons, sans participation officielle de la Suisse, le projet UTES, *Underground*

Thermal Energy Storage. Certains pays ont une avance considérable en matière d'utilisation des aquifères pour le refroidissement et le chauffage par pompe à chaleur (Pays-Bas, Suède), dans des applications économiquement très rentables.



Deux forages pilotes de 160 m de profondeur ont été réalisés à Lucerne sur le site de stockage saisonnier de chaleur du futur complexe de la SUVA et une nouvelle méthode de tests de réponse a permis de déterminer la qualité thermique des sondes in situ pour dimensionner au mieux le stock et les longueurs de sonde nécessaires.

Transferts à la pratique, Projets P+D

Le transfert à la pratique des travaux concernant les stocks diffusifs sans pompe à chaleur ne peut encore être accompli. La recherche d'un pilote est en cours.

Des projet pilotes de stocks diffusifs fonctionnant avec pompes à chaleur sont en fonctionnement depuis plusieurs années et nos rapports annuels précédents ont montré leur qualité. Certains bureaux d'études sont devenus des spécialistes en Suisse et à l'étranger.

Nous n'avons pas obtenu de nouveaux projets P+D cette année du fait de l'étrécissement du marché des grandes constructions neuves en Suisse et du choix des économies d'énergie avant une production alternative.

L'an dernier nous avons rapporté sur plus de dix projets P+D. Les projets pilotes encore en cours en 2000 sont au nombre de quatre.

Le pilote le plus démonstratif est l'installation du **Collège de Peseux**, Neuchâtel, qui fonctionne à satisfaction depuis 1996 [11]. Le stock de 29'000 m³ comporte 30 sondes de 60 m de profondeur exploité par une pompe à chaleur et rechargé par des absorbeurs solaires. L'installation a été mesurée durant 4 ans et le rapport final est attendu. Les principaux résultats sont les suivants :

- En recharge, la température maximale a atteint 52 °C lors de la 4^e saison et en décharge la température minimum à la sortie du stock est passée de 2 à 5 °C en 4 ans. Un excès de charge du stock d'environ 40% en moyenne est observé du

fait du surdimensionnement du champ d'absorbeur par rapport à l'extraction hivernale.

- En 4 ans, le COP de la pompe à chaleur a baissé de 4% malgré l'élévation de température du stock de 2 à 3 °C. La consigne, prescrite par le fabricant, de 12 °C maximum à l'entrée de l'évaporateur devrait pouvoir être augmentée pour bénéficier encore plus de la source de chaleur qu'est le stock, mais le fabricant ne veut pas prendre ce qu'il juge être un risque pour la machine.
- Le COP de la pompe à chaleur à gaz est en moyenne de 1.42 sur les 4 ans, sans dérive. Le condenseur sur les gaz du moteur fournit 14% de l'énergie thermique produite par le groupe PAC-moteur à gaz, et ce groupe fournit 79% des besoins pour une puissance nominale de seulement 49%. Le dimensionnement est donc correct.
- Les problèmes à noter sur cette installation sont mineurs : l'encrassement du désurchauffeur de la pompe à chaleur et des fuites aux raccords des absorbeurs. Le bilan financier de l'installation du Collège de Peseux serait équilibré si le gaz valait 6.4 cts par kWh.

L'installation de Peseux a été visitée par une délégation d'Électricité de France et une délégation de la commission de construction du centre SUVA-CNA de Lucerne où nous espérons un projet analogue, mais 5 fois plus grand.

Le projet pilote du bâtiment de la Caisse d'assurances cantonales de Lucerne, **Buchenhof**, à Aarau comporte 20 sondes de 120 m de profondeur. Il est en service depuis 2 ans. Les mesures sont terminées et les principales conclusions sont les suivantes :

- Le centre est chauffé à 44% par l'utilisation des rejets de chaleur des machines de froid du centre informatique, à 18% du stock saisonnier exploité en hiver par une pompe à chaleur et à 5% par une pompe à chaleur sur l'air. Les 33% restants sont fournis par une chaudière à mazout.
- En 2 ans, 734 MWh ont été injectés dans le stock, mais seulement 144 MWh ont été repris par l'évaporateur de la pompe à chaleur de 160 kW du côté du condenseur, car les rejets de chaleur sont utilisés en direct pour satisfaire la demande en chaleur en hiver. La température moyenne du stock s'est élevée de 1.7 °C de ce fait, ce qui a pour conséquence d'augmenter le rendement de la pompe à chaleur de 3.6% qui atteint ainsi un COP de 3.72.
- Le bilan financier montre que l'économie annuelle d'énergie procurée par le stock est égale à l'amortissement de l'investissement. Le coût de l'énergie produite par la pompe à chaleur et le stock est de 22 cts / kWh ce qui est élevé, car le taux d'utilisation de la PAC est faible (1'000 h / an).

L'installation pilote a permis à un bureau d'études important d'acquiescer une première expérience positive dans ce domaine. Le rapport final est disponible [15].

Après quatre ans d'hésitations, la **SUVA** n'a toujours pas choisi de solution pour son futur centre de Root près de Lucerne, dont la construction semble sans cesse repoussée. La variante de production de chaleur avec stockage saisonnier, que nous souhaitons voir être choisie par la SUVA, a été simulée par D. Pahud avec TRNSYS et prévoit 49 sondes de 160 m de profondeur espacées de 6.5 m. Un forage carotté et deux tests de réponse sur deux sondes de 160 m de profondeur avaient été réalisés sur le futur site en 1999. Les résultats de l'analyse thermique montrent un sol à forte conductibilité thermique ($3.6 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$) et à capacité calorifique assez classique ($2.3 \text{ MJ} / \text{m}^3 \cdot \text{K}$). La formation découverte (OMM) est adaptée au stockage de chaleur, et il n'y a pas d'écoulement d'eau souterraine [7].

Les tests de réponse ont été interprétés par D. Pahud en 1999, mais un complément d'étude a permis les deux conclusions suivantes :

- Il n'est pas recommandé de prévoir le mode « refroidissement direct » depuis le stock dans le schéma de principe, car les groupes de froid couvrent tous les besoins, même avec une température tolérable pour le refroidissement allant jusqu'à 18 °C (référence : 10 °C).
- Il n'est pas recommandé d'isoler les tubes de liaison horizontaux soumis à l'eau souterraine,

mais, du fait des températures de travail du stock, de les regrouper en une torche chaude et une torche froide et de bien les poser éloignés dans le caniveau.

Les résultats des tests de réponses ont été communiqués dans un séminaire international organisé en Belgique par le programme ECES de l'AIE (Annexes 12 et 13) tenu à Mol en Belgique en octobre 2000. Le travail de dimensionnement final par simulation a dû être mis en attente faute de décision de la SUVA [10].

L'installation **des Brenêts** comporte un stock saisonnier sous forme de 50 fûts de récupération de 200 l remplis d'eau. La charge doit être assurée par 80 m² de capteurs à air. La couverture transparente de la façade solaire a été refaite et a supporté l'ouragan Lothar. Le système de mesure et de commande ne cesse de tomber en panne lors des orages, ainsi les mesures 2000 ne sont pas exploitables. Une telle installation montre les limites des projets pilotes pour lesquels les ressources humaines sont limitées et la reproductibilité du concept insuffisante. Le rapport final est repoussé d'un an [14].

Le projet pilote **Cost'EAU** du CUEPE Genève s'intéresse à mieux connaître les puits canadiens. Lors de la construction du nouveau siège administratif de la société Perret à Satigny (GE), une solution innovante pour le chauffage et le rafraîchissement a été réalisée par la société Ecoconfort (Préverenges, VD). Le système est composé d'un collecteur terrestre à eau, horizontal, utilisé habituellement pour les pompes à chaleur, de coût réduit. Il est situé dans la partie inférieure de la dalle, sous le bâtiment. Il a une double fonction :

- Aspect énergétique (hiver) : préchauffage de l'air neuf par extraction de la chaleur emmagasinée dans le sous-sol. Le complément de chauffage se fait directement sur l'air par une batterie de chauffage, après récupération de la chaleur de l'air vicié.
- Aspect de confort (été) : rafraîchissement de tout le bâtiment en dessous du seuil minimum de confort, ce qui permet d'éviter un groupe de froid.

Le dimensionnement a été basé sur l'expérience acquise par la mise en place d'environ 150 collecteurs terrestres identiques pour des villas équipées d'une pompe à chaleur terre - eau. Le collecteur comporte 10 boucles de 100 m de tube PE 32x28 mm réparties sur une surface de 300 m², soit un écartement moyen de 30 cm. Il est disposé dans la partie inférieure de la dalle du bâtiment. La puissance de la pompe de circulation est de 140 W pour un débit d'environ 1'000 l / h. Le collecteur prend en été et cède en hiver de l'énergie thermique à l'air neuf de ventilation. Une régulation simple par thermostat met en service le circulateur quand la température de l'air neuf à l'entrée du bloc de ventilation est soit inférieure à 6 °C (hiver), soit supérieure à 17 °C (été). Le concept se veut très simple et l'ensemble a ainsi un coût très réduit.

Il s'agit dans cette étude de vérifier le fonctionnement de ce système par une mesure *in situ* d'une année, aussi bien pour le préchauffage de l'air en hiver que le potentiel de rafraîchissement en été, de déterminer le coût de la chaleur et du froid économisé et, si le système s'avère intéressant, de faire connaître cette réalisation.

Les premiers résultats de l'été 2000 ont montré que le confort a pu être maintenu à 26.3 °C dans le bâtiment même lorsque la température extérieure atteignait

30 °C. Les résultats sont exploités également dans la thèse à paraître de M. Hollmuller, le chercheur principal [16].

Enfin et malgré notre insistance, les rapports finaux des installations pilotes de la **Hochschule St. Gallen** (bureau Schär AG) et de la villa Fleury à **Épalinges** ne nous sont pas encore parvenus [12, 13]. Une action est entreprise.

Évaluation 2000

Deux faits sont à relever :

- les moyens financiers très modestes du programme pour la recherche, qui ne peuvent nous emmener vers des horizons ambitieux.
- la non-décision de la SUVA, alors que nous avions réservé notre budget P+D pour ce projet.

Les résultats obtenus sont conformes aux attentes : des outils de simulation mais aussi des règles de dimensionnement sont désormais disponibles pour :

- le stockage en dalle active
- le stockage diffusif par sondes
- le stockage en aquifère.

La difficulté principale est la faiblesse du marché des technologies nouvelles de chauffage.

L'installation du collège de Peseux, pour laquelle nous avons 4 ans de mesure, est un exemple à populariser.

Nous avons commencé une ré-orientation du programme de recherche vers le stockage court terme. La recherche concernant les nouveaux matériaux de stockage solaire (zéolithe) est en bonnes mains au SPF de Rapperswil.

En ce qui concerne les projets pilotes, nous orienterons la prospection vers des projets d'amélioration du stockage solaire pour les villas. Le projet de la SUVA ne sera plus conservé en priorité n° 1.

Perspectives 2001

Nous continuerons de chercher un projet de stockage solaire diffusif sans pompe à chaleur de plus de 600 MWh, pour lequel nous apporterons soutien technique et financier, si le budget P+D est maintenu, et le suivi scientifique.

Nous souhaitons voir les résultats des optimisations de SERSO et de Wollerau.

Le renforcement de la recherche sur la zéolithe au SPF sera envisagé selon les moyens qui seront mis à notre disposition.

Une collaboration pour la mise sur pied d'une nouvelle tâche AIE avec un collègue des Pays-Bas (J. van Berkel) sera à l'ordre du jour, pour nous permettre de décupler nos moyens de recherche dans le domaine de la zéolithe.

Des industriels devront être associés assez tôt à ces projets pour avoir une chance de solutions commercialisables.

Liste des projets de recherche

Légende : (RA) Rapport annuel disponible
(RF) Rapport final disponible (pas de rapport annuel dans l'année)

- [1] U. Frei et al., SPF/HS-Rapperswil: *Zeolithspeicher. Zeolithspeicher in der thermischen Solartechnik: Machbarkeit und Potential* (RF März 2000) ♦ *Sorptionsspeicher. Phase 1: Aufbau einer Laboranlage* (RA) <http://www.solarenergy.ch/>
- [2] B. Lachal, CUEPE, Genève: *RENOVA: Installation solaire active avec injection de chaleur en sous-sol* (RF à paraître en 2001) <http://www.unige.ch/cuepe/rapport/>
- [3] P. Hartmann, ZHW, Winterthur: *Akquisition eines Demonstrationsprojektes „Saisonale Speicherung von Sonnenenergie im Erdboden* (RA) <http://www.zhwin.ch>

- [4] S. Dupasquier, EPFL-Lausanne: *Conditions d'exploitation et paramètres géologiques optimaux pour le stockage de chaleur en aquifère en Suisse* (RF sous forme de Thèse de doctorat ès sciences EPFL, à paraître en 2001)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] B. Keller, Mengis + Lorenz AG, Luzern: *SUVA, Pilotbohrung für einen geothermischen Diffusions-speicher* (RA)

Liste des projets P+D

- [8] D. Pahud, G. Travaglini, SUPSI-DCT-LEEE *Canobbio*, A. Fromentin, EPFL-Lausanne: *Optimisation d'un stockage de chaleur en dalle active dans un immeuble d'habitation* (Projet P+DB, RF Novembre 2000)
- [9] D. Pahud, G. Travaglini, SUPSI-DCT-LEEE *Canobbio* : *Étude d'une maison solaire active avec stockage en dalles au Tessin* (Projet P+DB, RF Septembre 2000)
- [10] D. Pahud, SUPSI-DCT-LEEE *Canobbio* : *Étude pilote pour les bâtiments du Centre SUVA Lucerne. Analyse des réponses de 2 sondes tests et optimisation du stockage diffusif* (Projet P+DB, RA)
- [11] B. Matthey, BMIC, *Montezillon*: *Installation solaire pour le collège des Coteaux à Peseux avec stockage saisonnier par sondes verticales et pompe à chaleur à gaz – Optimisation* (RA)
- [12] H. SCHÄR, *St Gallen*: *Erdspeicheranlage für das Weiterbildungszentrum Hochschule St. Gallen* (Rapport non reçu)
- [13] F. Fleury, *Épalinges*: *Villa solaire avec stockage saisonnier en molasse* (Rapport non reçu)
- [14] P. Léchaire, *Les Brenêts*: *Maison solaire avec stockage saisonnier central chauffé par capteurs à air* (RA)
- [15] S. Wiederkehr, JOBST WILLERS ENGINEERING, *Rheinfelden*: *Verwaltungsgebäude Buchenhof, Aarau. Messkampagne des saisonales Erdspeichers* (RF Dezember 2000)
- [16] B. Lachal, CUEPE, *Genève* : *Cost'EAU. Rendement énergétique et économique d'un collecteur souterrain à eau pour le chauffage et le rafraîchissement* (Projet P+DB, RA)

PHOTOVOLTAIK

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 2000

Stefan Nowak
stefan.nowak.net@bluewin.ch



Symbiose von Architektur und Photovoltaik in historischem Stadtkern

6-kWp-Anlage mit halbtransparenten Modulen, Unterseen, (Industrielle Betriebe, *Interlaken*, Architekt: Mario Campi, Planung Photovoltaik: Fabrisolar)

Programmübersicht und anvisierte Ziele 2000

Das Jahr 2000 war für das Programm Photovoltaik (PV) durch Kontinuität anwendungsorientierter Projekte im nationalen Rahmen und eine anhaltende internationale Zusammenarbeit auf hohem Niveau gekennzeichnet. Die Zusammenarbeit mit der Industrie konnte dabei erneut intensiviert werden. Besonders hervorzuheben sind die fortschreitenden Arbeiten zur Umsetzung im Bereich der Dünnschicht-Solarzellen, welche in mehreren Projekten konkretere Formen annehmen. Trotz der allgemeinen Enttäuschung über den negativen Ausgang der eidgenössischen Abstimmungen vom 24. September 2000 war und bleibt das Interesse an der Photovoltaik aus den Sektoren Industrie und Finanzen (Banken, private Investoren) ungebrochen. Im Berichtsjahr waren rund 80 laufende Forschungs- und P+D-Projekte aktiv, wobei alle bekannten Projekte, unabhängig von ihrer Finanzierung, berücksichtigt sind. Somit bewegt sich die Projektzahl bei weiter zunehmendem Mitteleinsatz in der Grössenordnung des Vorjahres.

Die 5 Programmbereiche umfassen folgende Themen und Zielsetzungen:

Zellen: Die Arbeiten zu Dünnschicht-Solarzellen wurden im Berichtsjahr weitergeführt mit den Schwerpunkten **Silizium** (amorph, mikrokristallin, Nieder-Bandgap), den Zellen auf der Grundlage von Verbindungshalbleitern (CIGS, CdTe) sowie den Farbstoffzellen. In allen Technologien nehmen die Bestrebungen zur Umsetzung zu und es wurden, zusammen mit der Industrie, neue, prozessorientierte Projekte in Angriff genommen. Die Option von Solarzellen „made in Switzerland“ gewinnt angesichts dieser Tendenzen immer klarere Konturen. Verschiedene Substrate sind für neue Anwendungen in Nischenmärkten vorgesehen.

Module und Gebäudeintegration: Die **Integration der Photovoltaik** im bebauten Raum bildet weiterhin den Schwerpunkt der angestrebten Anwendungen. Verschiedene neuere Produkte konnten sich im Berichtsjahr im Markt festigen und werden in zunehmendem Mass exportiert. Hohe Qualität, ansprechendes Design und kompetitive Preise sind Merkmale dieser Lösungen. Während für viele Anwendungen

mittlerweile gute Integrationslösungen bestehen, erfährt die Kostenseite gegenwärtig weitere Verbesserungen. Neue Konzepte (z.B. PV Isoliergläser) finden weiterhin Einzug in die Praxis. Im Zusammenhang mit der sich abzeichnenden, zunehmenden Anwendung von Dünnschicht-Zellen werden in Zukunft fortgeschrittene Systemlösungen notwendig, welche Modul- und Gebäudefunktion vereinen.

Systemtechnik: Die **Qualitätssicherung und Standardisierung** bleiben Themen, welche angesichts der fortschreitenden Marktentwicklung der Photovoltaik weiter an Bedeutung gewinnen. Auf der Komponentenebene liegen breite Erfahrungen über längere Zeit vor, welche die Produkte hinsichtlich Ertrag und Zuverlässigkeit gut charakterisieren lassen. Neue Produkte können aus den Erfahrungen früherer Konzepte Nutzen ziehen. Korrekt geplant und professionell gebaut, können Photovoltaikanlagen über lange Zeit zuverlässig Energie produzieren. Einfache Konzepte zur Qualitätssicherung sind deshalb auch aus technischer Sicht wünschbar.

Diverse Projekte und Studien: **Kombinierte Nutzungsformen** der Photovoltaik (z.B. Hybridtechnologien, Thermophotovoltaik) entsprechen einem häufig geäusserten Wunsch. Dabei sind jedoch, nebst der technischen Machbarkeit, auch die Marktrelevanz und die Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen. In Zukunft sollen diese Kriterien deshalb noch besser quantifiziert werden. Fortgeschrittene **Hilfsmittel zur Planung** (Einstrahlung, Horizonterfassung, Dimensionierung und Simulation) bilden anerkannte Werkzeuge, welche weiter etabliert werden sollen.

Internationale Zusammenarbeit: Die internationale Zusammenarbeit bildet ein zentrales Standbein in allen Bereichen. Der Anschluss an die internationale Entwicklung sowie ein intensivierter Informationsaustausch war auch im Berichtsjahr ein wichtiges Ziel, welches im Rahmen der internationalen Programme der **EU** sowie der **IEA** weiterverfolgt wurde. Relevanz der Projekte und bessere Kohärenz bilden Elemente, welche in Zukunft vermehrtes Gewicht erhalten. Als neues Thema wird die internationale Entwicklungszusammenarbeit stärker aufgegriffen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

ZELL-TECHNOLOGIE

Im Berichtsjahr begann am Institut de Microtechnique (IMT) der Universität Neuchâtel eine neue Projektphase zu den **Mikromorphen Solarzellen** [1] mit Schwerpunkt auf den industriell relevanten Produktionsschritten und -prozessen, wie sie in einer Machbarkeitsstudie zur industriellen Umsetzung [1] im Jahr 1999 identifiziert wurden. Dies bedeutet, dass nicht die Rekordwerte einzelner, losgelöster Parameter im Vordergrund stehen, sondern die industrielle Machbarkeit stets mitberücksichtigt wird. Das am

IMT entwickelte Konzept findet international weiterhin grosse Beachtung als vielversprechende Option im Bereich des Dünnschicht-Siliziums. Die Arbeiten konzentrieren sich auf die Verbesserung der Eigenschaften transparenter Oxydschichten (TCO) auf der Basis von ZnO, die Möglichkeiten zur Optimierung der p-i-n und n-i-p Schichtabfolgen für das amorphe Silizium sowie die Herstellung von mikromorphen Mini-Modulen. Ein TCO mit guten optischen und elektrischen Eigenschaften konnte auf einer Fläche von bis zu 30 x 30 cm² hergestellt werden. Es konnte

gezeigt werden, dass auch mit einfachen p-i-n Strukturen (amorphes Si) in Kombination mit gutem TCO und optimiertem Zell-Design ein stabilisierter Wirkungsgrad von 9% möglich ist. Mit einem neuen Lasersystem können Mini-Module rascher strukturiert und monolithisch verschaltet werden, sodass das IMT nun über sämtliche für die Praxis relevanten Prozessschritte verfügt. Mikromorphe Mini-Module mit einer aktiven Fläche von 23.3 cm² konnten mit einem stabilisierten Wirkungsgrad von 9.1% hergestellt werden. Das Projekt **SOLANT** [1] mit Unterstützung der ESA wurde im Berichtsjahr verlängert: Ein neuer Prototyp einer Satellitenantenne mit integrierter Solarzelle wurde hergestellt (0.9 W bei 9.2 V unter Weltraum-Strahlungsbedingungen). Mit einem Polyimid-Substrat werden trotz geringem Wirkungsgrad Leistungsdaten von 433 W/kg erreicht. Protonenstrahl-Experimente zur Abklärung der Stabilität zeigen das unterschiedliche Verhalten von amorphen und mikromorphen Solarzellen.

In einem neuen KTI-Projekt arbeiten das Centre de recherche en physique des plasmas (CRPP) an der EPFL und das IMT zusammen mit Unaxis (vormals Balzers) an einer **grossflächigen, schnellen Beschichtungsanlage** [2] für Silizium-Dünnschicht-solarzellen. Grosse Substrate (typisch 1 m² und mehr) sollen unter Verwendung der in früheren Projekten am IMT und am CRPP erarbeiteten Erkenntnisse bei Frequenzen von 27.12 und 40.68 MHz beschichtet werden. Im Berichtsjahr standen die Gleichmässigkeit der Schichten und das Elektroden-Design im Vordergrund.



Bild 1: Roll-to-roll Reaktor bei VHF-Technologies

In einem neuen KTI-Start-up Projekt wird an der Fachhochschule Le Locle in Zusammenarbeit mit VHF-Technologies an der Entwicklung eines **kontinuierlichen (roll-to-roll) Fabrikationsprozesses** [3] von amorphen Solarzellen auf Kunststoffsubstraten gearbeitet. Mit einer in-situ Abscheidung sämtlicher Schichten auf einem 30 m langen, 30 cm breiten Polyimidsubstrat soll für einen Wirkungsgrad von 3% eine Beschichtungskapazität von 2000 m²/Jahr erreicht werden. Im Berichtsjahr konnte der Reaktor (Bild 1) plangemäss in Betrieb genommen und die

Abscheidung der einzelnen Schichten in der erforderlichen Qualität realisiert werden. Als erste Produkte sind vorerst kleine elektronische Anwendungen vorgesehen.

Am PSI wurde das Projekt zur Entwicklung von **Nieder-Bandgap-Zellen** [4] im Berichtsjahr fortgesetzt, wobei diese Zellen für die Anwendung in der Thermophotovoltaik vorgesehen sind. Dazu sind geeignete Kombinationen von Strahlungsquelle, Emitter, Filter und Photozelle notwendig. Es wurden spektral selektive Emitter auf der Basis von Oxyden seltener Erden (Yb, Er) bezüglich Emission charakterisiert. Selektive Filter sollen längerwellige Strahlung von der Photozelle abhalten und zum Emitter zurück reflektieren. Verschiedene Photozellen (Si, Ge) wurden unter AM 1.5 Strahlung sowie unter Emittersonnenstrahlung beleuchtet und miteinander verglichen. Dabei treten deutliche Unterschiede auf, welche die unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit dieser Zellen belegen.

In der Gruppe Dünnschichtphysik an der ETHZ wurden verschiedene EU-Projekte zum Thema der Solarzellen auf der Basis von Verbindungshalbleitern fortgesetzt: Das Projekt **LACTEL** [5] wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Es wurden die strukturellen und elektronischen Eigenschaften von CdTe-Schichten in Superstrat- bzw. Substratkonfiguration verglichen. Dabei erweist sich die Substratkonfiguration in Abhängigkeit des Zellrückkontaktes als komplexer als die Superstratkonfiguration. Das Projekt **CADBACK** [5] geht der Frage der Optimierung des Rückkontaktes weiter nach: Pufferschichten von Sb oder Sb₂Te₃ und Mo Metallschichten als Rückkontakt auf den CdTe-Zellen erreichten eine gute Stabilität des Wirkungsgrades (10-12%). Das Projekt **WIDE GAP CPV** [5] wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Es wurden CIGS-Zellen in Superstratkonfiguration abgeschieden; diese erreichten mit ca. 8% Wirkungsgrad gegenüber der Substratkonfiguration (15.8%) lediglich den halben Wirkungsgrad, was durch eine tiefe Ladungsträgerkonzentration erklärt wird. Durch die ZnO:Al-Schicht wird die für gute Schichten notwendige Na-Diffusion verhindert. Im Projekt **FLEXIS** [5] werden CIGS-Zellen auf flexiblen Substraten entwickelt. Im Jahr 1999 konnte auf Polyimid eine flexible Zelle kleiner Fläche mit 12.8% Wirkungsgrad abgeschieden werden; in einem neuen Ansatz wird die Polymerschicht als Fenster nach der Solarzelle aufgebracht, wodurch höhere Prozesstemperaturen möglich werden. Bisher wurde mit diesem Konzept ein Wirkungsgrad von 8.5% erreicht; es wird erwartet, dass dieser Wert deutlich verbessert werden kann.

Farbstoffsensibilisierte, **nanokristalline Solarzellen** (Grätzel-Zellen) [6] bilden weiterhin ein Gebiet hohen Interesses: am Institut de chimie physique (ICP) der EPFL wird an den grundlegenden Aspekten der Sensibilisierung des Farbstoffes (spektrale Ausbeute) sowie an der Verwendung eines festen Heteroübergangs zwischen der farbstoffsensibilisierten, porösen Oberfläche und einem festen Elektrolyten gearbeitet. Die Schwierigkeit besteht darin, den für den La-

dungsaustausch zwischen diesen Materialien notwendigen intimen Kontakt sicherzustellen. In einem PSEL-Projekt werden **Freiluftmessungen** [6] an farbstoffsensibilisierten Solarzellen vorbereitet, durch welche das Verhalten dieser Zellen unter realen Außenbedingungen getestet werden soll. Von besonderem Interesse ist das Verhalten bei UV-Strahlung. Zu diesem Zweck müssen die Zellen bzw. Kleinmodule hinreichend gut verpackt werden. Solaronix untersucht in einem EU-Projekt die **Langzeitstabilität** [7] von Farbstoffzellen. Im Berichtsjahr wurde dazu eine umfangreiche Messapparatur aufgebaut. Je nach Zusammensetzung des Elektrolyten konnten Einflüsse der UV-A-Strahlung beobachtet werden.

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. Als nächster Schritt soll die Ankoppelung der Antennen an einen geeigneten Halbleiter realisiert werden.

Die ganze Bandbreite der Schweizer Solarzellenforschung wurde im Berichtsjahr mit Unterstützung verschiedenster Institutionen fortgesetzt. Die Umsetzung in industrielle Produkte, sei es für Kleinanwendungen oder für Prozesse, nimmt zunehmend Form an, sodass Solarzellen der nächsten Generation „made in Switzerland“ keine Utopie mehr sind: In den nächsten Jahren bestehen berechtigte Aussichten auf konkrete Produkte. Parallel dazu wird an den grundlegenden Konzepten der übernächsten Generation von Solarzellen gearbeitet.

SOLARMODULE UND GEBÄUDE-INTEGRATION (siehe auch P+D)

Im EU-Projekt **PV en face!** [9] am Laboratoire d'énergie solaire (LESO) der EPFL werden neue Lösungen zur Fassadenintegration erarbeitet. Neue Befestigungssysteme sollen entwickelt und praxisnah getestet werden. In einem schrittweisen Vorgehen werden dazu Prototypen gebaut und geprüft. In der letzten Version konnten sowohl die mechanischen Anforderungen als auch die Ästhetik zufriedenstellend gelöst werden. Als konkretes Ergebnis des Projekts soll im Frühling 2001 unter dem Titel SOLFACE ein neues Produkt auf den Markt kommen.

Das Projekt **DEMOSITE** [9] zeigt nebeneinander zahlreiche Varianten der Photovoltaik Gebäudeintegration auf Flachdächern, Schrägdächern und Fassaden. Als internationales Projekt ist es bei IEA PVPS in Task 7 eingebettet. Aufgrund der Möglichkeiten zum direkten praxisnahen Vergleich konnten verschiedene Produkte verbessert bzw. Lösungen im Verlauf des Projektes angeregt werden. Im Berichtsjahr wurden drei neue Stände eingerichtet: SOLGREEN® (Bild 2), COLT und PIL-SIM. Das Projekt und detaillierte Informationen dazu können über Internet virtuell besucht und abgerufen werden (www.demosite.ch). Unter Verwendung des Internets soll mit einem Kurs zur Photovoltaik Gebäudeintegration auch die Weiterbildung vorangetrieben werden. Die Arbeiten bis und mit 1999 wurden in einem Schlussbericht zusammengefasst.



Bild 2: Gründach Photovoltaik Anlage mit Solgreen an der EPF Lausanne

Im neuen EU-Projekt **HIPERB** [10] entwickelt Atlantis unter Verwendung von CIGS-Zellen eine neue Variante des Produktes SUNSLATES®. Das Projekt erlaubt, die konzeptionellen Änderungen durch die Verwendung von Dünnschicht-Solarzellen zu konkretisieren. Diese Entwicklung kann stellvertretend für eine Vielzahl neuer Produktlösungen der Photovoltaik Gebäudeintegration aufgeführt werden, wel-

che durch den Einsatz von Dünnschicht-Solarzellen in den nächsten Jahren erwartet werden dürfen.

Weitere neue Konzepte und Produkte zur Photovoltaik-Gebäudeintegration wurden im Rahmen von P+D-Vorhaben erprobt (siehe P+D-Projekte).

SYSTEMTECHNIK

Am Laboratorio di energia, ecologia ed economia (LEEE-TISO) an der Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI) begann im Berichtsjahr eine weitere Projektphase zu **Qualitätssicherung und Energieertrag von Photovoltaik Modulen** [11]. In einem neuen Zyklus wurden unter Einsatz eines neuen Datenakquisitionssystems Messungen an 17 Modulen (7 mc-Si, 7 pc-Si, 2 a-Si und 1 CIS) in Angriff genommen (Bild 3). Erste Resultate zeigen bei einigen Produkten starke und kontinuierliche negative Abweichungen von der spezifizierten Leistung (>10%). Detaillierte Analysen wurden bei unterschiedlichen Einstrahlungen und Temperaturen durchgeführt. Ein Sonnen-Simulator der Klasse A wurde im Berichtsjahr in Betrieb genommen. Damit sind fortan Messungen bei STC-Bedingungen auch für Dritte möglich. Eine Zertifizierung des Messlabors ist in Vorbereitung. Die Langzeitmessungen an drei hauseigenen Anlagen wurden im Berichtsjahr fortgesetzt. Ein neues EU-Projekt **MTBF-PV** [11] zusammen mit der Europäischen Prüfstelle in Ispra vertieft anhand der am TISO bestehenden, ältesten netzgekoppelten Photovoltaik Anlage Europas (10 kWp, 1982) die Langzeitanalysen. Es zeigte sich, dass eine grosse Mehrheit der Module eine Verfärbung der Einkapselungsmasse sowie Delaminationen aufweist. Trotzdem erreichen die Module und die Anlage gute Produktionswerte. Es ist vorgesehen, sämtliche 273 Module einer ausführlichen Messung zu unterziehen, um statistisch signifikante Resultate zu erhalten.



Bild 3: Teststand für Modulprüfungen am LEEE-TISO

Am PSI werden Messungen [4] unter **realen Betriebsbedingungen** durchgeführt. Aufgrund der ausführlichen Analyse kann der Energieertrag von Photovoltaik Modulen unter Teillastverhalten parametrisiert werden. Es wurden auch Module mit neuen Technologien untersucht.

Am Photovoltaiklabor an der HTA Burgdorf wurde das Projekt **Qualitätssicherung von Photovoltaikanlagen** [12] abgeschlossen, wobei hier der Schwerpunkt auf den Wechselrichtern liegt. Um die Prüfungen flexibler durchführen zu können, wurde zum bisherigen 5-kW-Solargenerator-Simulator ein

neues Gerät mit bis zu 25 kW Leistung gebaut. Damit können auch grössere Wechselrichter rascher geprüft werden. Insgesamt wurden über die letzten 10 Jahre 27 netzgekoppelte Wechselrichter zwischen 100 W und 20 kW Eingangsleistung eingehend geprüft. Über diesen Zeitraum konnte infolge Markterfahrung und Produktverbesserungen eine deutliche Verringerung der Ausfallquote festgestellt werden. Mit Unterstützung der Gesellschaft Mont Soleil, den Elektrizitätswerken von Burgdorf (neu Localnet AG), Elektra Baselland sowie des BFE konnte eine Fortsetzung der **Langzeitbeobachtungen** [12] an einem breiten Park von 38 Photovoltaik Anlagen sichergestellt werden. Neu wird im Messprogramm der HTA Burgdorf auch die Anlage auf dem Mont Soleil aufgenommen. Das EU-Projekt **PV-EMI** [12] wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Ausführliche Messungen der durch Blitzeinschlag induzierten Spannungen wurden in Abhängigkeit von Modulrahmen, Aluminiumrückfolie und Bypassdioden ausgeführt. Ebenso wurden DC-seitige HF-Emissionen analysiert und neue Impedanzwerte für die Netznachbildung vorgeschlagen.

Das Schwergewicht in der Systemtechnik generell liegt auf der Qualitätssicherung von Komponenten (Module, Wechselrichter), Systemen (Auslegung, Energieertrag) und Anlagen (Langzeitbeobachtungen). Die Erkenntnisse aus diesen praxisnahen 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.

DIVERSE PROJEKTE UND STUDIEN

Die Vorarbeiten zur kombinierten Nutzung von Photovoltaik und thermischer Solarenergie in einem **PV/T Hybridkollektor** [9] wurden am LESO der EPFL abgeschlossen. Die Anforderungen an die thermische Absorption des amorphen Siliziums und das Verhalten bei Stagnationstemperaturen bis 210 °C konnten an einzelnen Prüflingen und Materialkombinationen grundsätzlich erfüllt werden. Es zeigt sich, dass eine optimale Lösung dieser kombinierten Anwendung weitere Entwicklungsarbeiten benötigt, welche sich nach dem Markt ausrichten müssen. Für den PV/T Hybridkollektor ist in erster Linie die thermische Anwendung die Leitgrösse, aus welcher sich ein Marktpotential ergibt.

Im EU-Projekt **PVSAT** [13] wird von Enecolo an der Fernüberwachung von Photovoltaik Anlagen unter Nutzung von Satellitenbildern gearbeitet. Im Berichtsjahr wurde eine Projektdatenbank mit 70 Projekten in Deutschland, Holland und der Schweiz erstellt und der Ertrag dieser Anlagen mit der PVSAT-Software überwacht. Es zeigt sich, dass in der Regel eine Vorhersage innerhalb $\pm 10\%$ des tatsächlichen Ertrags möglich ist. Das neue EU-Projekt **ENERBUILD** [13] wird als Thematisches Netzwerk zwischen 57 Partnerinstitutionen die in Europa bezüglich Energie im Gebäude laufenden RTD-Aktivitäten erfassen und die Zusammenarbeit auf diesem Gebiet verstärken. Es werden Informationen

aus allen Technologien zum Thema Energie im Gebäude zusammengetragen. Enecolo ist dabei für das Arbeitspaket *Photovoltaik in Gebäuden* verantwortlich.

Im EU-Projekt **PHOTO-VENT** [10] arbeitet Atlantis an einem mittels Photovoltaik betriebenen, intelligenten Ventilationssystem zur natürlichen Belüftung von Gebäuden.

ESU-Services hat in einer Literaturstudie zu **Umweltaspekten der Photovoltaik** [14] die aktuellsten Daten zu diesem Thema zusammengetragen und daraus Gebiete mit weiterem Handlungsbedarf identifiziert, besonders in Hinsicht auf die Energie- und Stoffflüsse einzelner Produktionsprozesse. Gegenüber einer Beurteilung im Jahr 1996 ist aber der Verbrauch nichterneuerbarer energetischer Ressourcen bei den betrachteten Prozessen deutlich zurückgegangen. Die Thematik der Ökobilanzierung der Photovoltaik ist auch im Zusammenhang mit den Labels für umweltgerechte Elektrizität zu sehen.

Im EU-Projekt **Multi-user solar hybrid grids** [15] werden an der Universität Zürich die sozialwissenschaftlichen Aspekte der Solarstromversorgung in netzfernen Dörfern untersucht. Im Vordergrund stehen die Auswirkungen einer solchen Energieversorgung auf die soziale Organisation der nutzenden Gruppe.

INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT IEA, IEC, PV-GAP

Die Beteiligung am Photovoltaikprogramm der IEA, IEA PVPS, wurde im Berichtsjahr, sowohl auf der Projektebene als auch im Executive Committee kontinuierlich fortgesetzt. Berichte und Publikationen zu diesem Programm können von der entsprechenden website (www.iea-pvps.org) abgerufen werden.

Nova Energie vertritt die Schweiz in Task 1, welches allgemeine **Informationsaktivitäten** [16] zur Aufgabe hat. Im Berichtsjahr wurde ein weiterer nationaler Bericht über die Photovoltaik in der Schweiz bis 1999 [34] erstellt; auf dieser Grundlage wurde die 5. Ausgabe des jährlichen internationalen Berichtes über die Marktentwicklung der Photovoltaik in den IEA-Ländern erstellt [35]. Der IEA PVPS-Newsletter [36] informiert regelmässig über die Arbeiten im und rund um das IEA-Programm. Zum Thema der Wertbetrachtung der Photovoltaik wurde in Glasgow anlässlich der 16. Europäischen PV-Konferenz ein weiterer Workshop organisiert.

In Task 2 über **Betriebserfahrungen** [17] ist TNC der Schweizer Experte. Im Berichtsjahr wurde die internationale Datenbank vollständig überarbeitet und mit neuen Anlagen aktualisiert.

Dynatex beteiligt sich an den Arbeiten in Task 3 über **Insulanlagen** [18]. Schwerpunkte der Aktivitäten dieses Projektes bilden die Qualitätsverbesserung und die Zuverlässigkeit von autonomen Photovoltaik Anlagen sowie technische Fragen in hybriden Systeme-

men und Batterien. In der Schweiz wurde im Berichtsjahr ein Workshop durchgeführt, welcher sich mit entsprechenden Qualitätssicherungsfragen befasste.

Das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (EWZ) stellt den Schweizer Beitrag in Task 5 zu technischen Fragen der **Netzankoppelung** [19] von Photovoltaik Anlagen. Eine Übersicht der nationalen Vorschriften zur Netzanbindung wurde im Berichtsjahr aktualisiert. Die Inselbildung von Photovoltaik-Anlagen wird im Rahmen von umfangreichen Abklärungen weiter untersucht. Das Verhalten von elektrischen Netzen mit hoher Durchdringung von Photovoltaik-Anlagen wird mit Computerprogrammen simuliert.

Task 7 zur **Integration der Photovoltaik in den bebauten Raum** [13] wird von Enecolo betreut. Eine Datenbank mit 450 gebäudeintegrierten Projekten kann unter www.task7.org eingesehen werden. Weitere Beiträge aus Sicht des Designs befassen sich mit Fallstudien, Beispielen und Hilfsinstrumenten. Dazu konnte aus der Schweiz die Software PVSYST 3.0 [33] beigesteuert werden. Das Subtask zu den technischen Aspekten wird durch die Schweiz koordiniert. Nicht-technische Aspekte werden ebenfalls bearbeitet und es wurde ein erster Bericht [37] darüber publiziert. Aus der Schweiz wird durch NET ein Beitrag zu Fragen des Potentials der Photovoltaik geleistet. Im Berichtsjahr fanden breite Informationsaktivitäten statt: die Solar Electric Buildings Conference, ein Design-Wettbewerb und in der Schweiz das Projekt DEMOSITE an der EPFL (siehe oben). Mehrere Schweizer Projekte erhielten im Design-Wettbewerb Auszeichnungen.

Mit Unterstützung des Staatssekretariats für Wirtschaft (seco) leistet Entec den Schweizer Beitrag zu Task 9 über die **Photovoltaik Entwicklungszusammenarbeit** [20]. Die Arbeiten zur Formulierung von Empfehlungen in Hinsicht auf die Anwendung der Photovoltaik in Entwicklungsländern wurden konkretisiert und erste Entwürfe dazu ausgearbeitet. Die Schweiz ist in diesem Projekt für die Koordination der Arbeiten mit multilateralen und bilateralen Organisationen verantwortlich. Es wird angestrebt, die Schweizer Photovoltaik vermehrt in dieses wichtige Gebiet einzubringen.

Alpha Real vertritt die Schweiz im TC 82 der IEC und leitet die entsprechende Arbeitsgruppe, welche internationale **Normenvorschläge** [21] für Photovoltaiksysteme vorbereitet und verabschiedet. Alpha Real beteiligt sich ausserdem an **PV-GAP (PV Global Approval Program)** [22], 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 sowie für vereinfachte Prozeduren zur Erlangung der PV-GAP Labels (Mark / Seal). Erste Produkte konnten erfolgreich zertifiziert werden.

Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr wurde die vielfältige nationale Zusammenarbeit anlässlich von Projekten und Veranstaltungen weiter gepflegt. In Zusammenarbeit mit der Industrie konnten neue Projekte in Angriff genommen werden. Erwähnenswert sind zudem themenspezifische Workshops und die Nationale Photovoltaik Tagung in Neuchâtel. Anlässlich dieser allgemein beliebten Tagung findet ein intensiver Erfahrungsaustausch statt, Diskussionen können vertieft und neue Ideen und Ansätze ausgetauscht werden. Damit besteht zwischen Forschung und Anwendung aber ebenso zwischen Fachkreisen, Elektrizitätswirt-

schaft und Behörden ein reger Austausch.

Auf Programmebene konnte die Zusammenarbeit mit vielen Stellen des Bundes, der Kantone und der Elektrizitätswirtschaft weiter ausgebaut werden. Besonders hervorzuheben sind dazu der stete Austausch mit dem BBW, der KTI, 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

Internationale Zusam

Die traditionsreiche internationale Zusammenarbeit wurde auch im Berichtsjahr fortgesetzt: Die institutionelle Zusammenarbeit innerhalb der IEA, der IEC und PVGAP wurde bereits beschrieben. Auf der Projektebene konnte die Zusammenarbeit innerhalb der EU mit vielen Projekten fortgesetzt werden: Im Jahr 2000 waren es 15 Projekte in der Forschung und 4 Projekte im Programm Energie der EU. Weitere Projekte finden in den Programmen ALTENER und mit der ESA statt. Mit der Annahme der bilateralen

Pilot- und Demonstr



Bild 4: Dachintegration mit SOLRIF

ÜBERSICHT

Insgesamt waren im Jahr 2000 im Photovoltaik P+D Bereich 43 Projekte aktiv. Dazu befanden sich anfangs 2001 im PV P+D Programm des Bundesamts für Energie nochmals rund 10 Projekte in der näheren Abklärung. Die P+D Aktivitäten verteilten sich auf die Bereiche Pilotanlagen, Komponentenentwicklung, Messkampagnen und auf Studien und Hilfsmittel. Die pilotmässige Erprobung neuer Komponenten bei P+D Anlagen im Massstab 1:1 bildeten einen klaren Schwerpunkt. Thematisch behandelten mehr als die

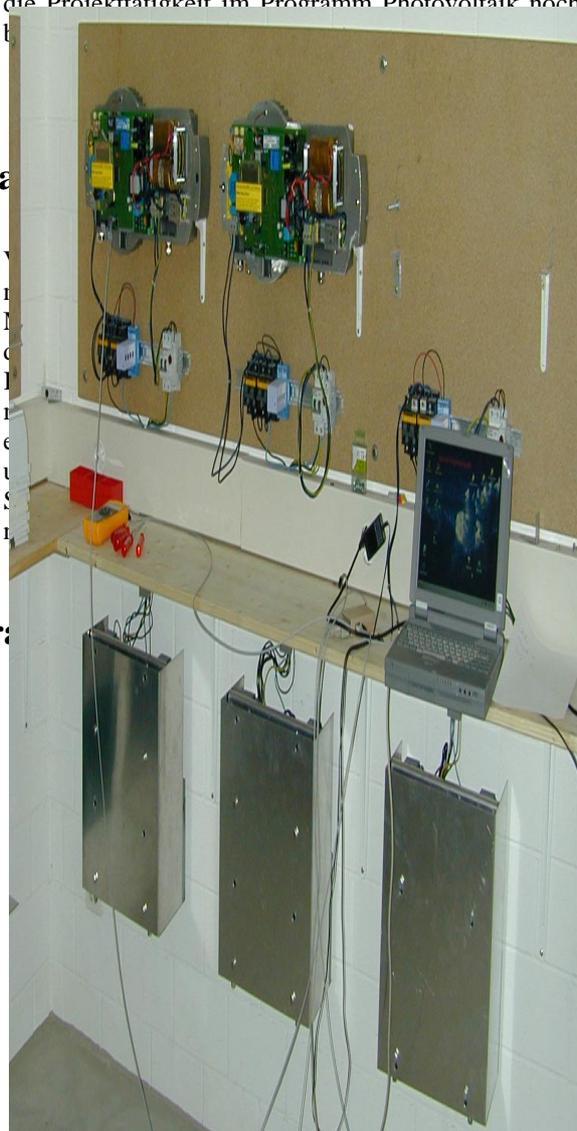


Bild 5: Wechselrichterprototyp mit LON Knoten

Hälfte der Projekte den Bereich der **Photovoltaik Gebäudeintegration**. Die andern Projekte verteilten sich auf die Bereiche Wechselrichtertechnologie, Schallschutz, frei aufgestellte Anlagen, Messungen zu diversen Anlagen, Qualitätssicherung und PV Planungshilfsmittel.

Die insgesamt hohe Qualität der Schweizer P+D Projekte zeigt sich im wachsenden Markterfolg dieser Produkte im In- und Ausland. Regelmässig finden Schweizer P+D Projekte auch international Anerkennung, was für die Qualität dieser Projekte spricht.

Beispiele dafür sind unter anderem:

- SOLRIF SOLar Roof Integration Frame [32] (B. 4)
- LonWorks als Feldbus für PV-Anlagen [23] (B. 5)
- Sonnensegel Münsingen [31]

NEUE P+D PROJEKTE



Bild 6: PV Metallfalzdach thermisch isoliert

Im Jahr 2000 wurden im PV P+D Programm 10 neue Projekte begonnen. Schwerpunkt blieb der Sektor Anlagen mit der Hälfte der neuen Projekte. Vom Standpunkt der Gebäudeintegration besonders interessant ist sicher das thermisch isolierte Metallfalzdach kombiniert mit amorphen Trippelzellen [22] (Bild 6). Die gewonnenen Erfahrungen flossen direkt in die Weiterentwicklung dieses Konzeptes ein. Die erste Realisierung einer Anlage der neuesten Generation ist für Frühling / Sommer 2001 geplant. Nach den positiven Erfahrungen im Labor und bei einem Test mit 3 Wechselrichtern mit LonWorks [23] als Kommunikationsplattform (Bild 5) ist für 2001 der pilotmässige Einsatz von 68 Wechselrichtern dieses Typs bei einer 250 kWp Anlage geplant. Erwähnenswert ist die Tatsache, dass bei der Schlusszusammenfassung des 15. PV Symposiums 2000 in Staffelstein der Wechselrichter mit LON Kommunikationsplattform als eines der Highlights der Ausstellung explizit erwähnt worden ist. Die Testfahrten eines Passagierschiffes für 200 Personen, dessen Antrieb das 20-kWp-Photovoltaik Schiffsdach (autonome Anlage) übernimmt, werden im Sommer 2001 beginnen [24].

LAUFENDE P+D PROJEKTE

Von den laufenden P+D Projekten im Anlagenbereich sind aus architektonischer Sicht Anlagen mit transparenten, zum Teil als Isoliergläser ausgebildeten Modulen besonders hervorzuheben (Kantonschule Stadelhofen [25] (Bild 7), PV Dächer Altstadt Unterseen [26] (Titelbild), Sheddachintegration

Domdidier [27]). Gerade die Photovoltaik-Isoliergläser enthalten durch Nutzung der bestehenden Haltekonstruktionen und durch den Ersatz von konventionellen Isoliergläsern (ev. in Kombination mit Beschattungsvorrichtungen) ein erhebliches Kostenreduktionspotential, was neuere Anlagen dieser Art ohne P+D Unterstützung belegen. Im Bereich Unterkonstruktion besteht allgemein eine Nachfrage nach preiswerten Produkten, die nach Möglichkeit durch einfachste Montage der Module weitere Kosteneinsparungen mit sich bringen, wie das 30 kWp Schrägdach in Hünenberg zeigt [28].

Aus den übrigen Bereichen sind u.a. interessante Ergebnisse in Bezug auf die Ertragssteigerung von Modulen mit speziell beschichteten Gläsern [29] und die Umsetzung verbesserter Qualitätssicherungsmaßnahmen [30] von besonderem Interesse.



Bild 7: Isolierglasmodule Kantonschule Stadelhofen

ABGESCHLOSSENE PROJEKTE

Bei den in diesem Jahr abgeschlossenen Projekten fiel das Projekt Sonnensegel Münsingen [31] besonders durch die hohe Medienpräsenz auf, was die Anstrengungen der Projektmitarbeiter in diesem Gebiet widerspiegelt. Hervorzuheben ist auch der neu entwickelte Dachintegrationsrahmen SOLRIF (Bild 4) für Standardmodule [32], der im In- und Ausland bis Ende 2000 bei dachintegrierten Anlagen mit einer Gesamtleistung von rund 250 kWp eingesetzt wurde. Abgeschlossen wurde auch die Überarbeitung der PV Software PVSYST 3.0 [33]. Dieses Auslegungs- und Simulationsprogramm wurde in der Ausgabe Photon 1-2000 als eines der leistungsfähigsten Programme dieser Art bezeichnet. Gut die Hälfte der im Jahr 2000 abgeschlossenen P+D Projekte haben die Marktumsetzung noch vor sich oder stehen ganz am Anfang davon. Welche Prototypen sich zu marktfähigen Produkten weiterentwickeln und sich im Markt etablieren können wird aufmerksam verfolgt werden.

Transfer in die Praxis

Der Transfer in die Praxis konnte auch im Berichtsjahr fortgesetzt werden; besonders hervorzuheben sind neue Projekte zur Umsetzung im Bereich der Dünnschicht-Solarzellen und der Farbstoffzellen. Hier konnte mit bestehenden und neu gegründeten Unternehmen eine Zusammenarbeit aufgebaut werden, welche einen Schritt weiter in Richtung des lang angestrebten Zieles Solarzellen „made in Switzerland“ führt. Weitere Industrieunternehmen sehen konkrete Schritte in diese Richtung vor.

Nebst diesen zellenorientierten Projekten findet eine kontinuierliche Umsetzung im Bereich der Komponenten für die Gebäudeintegration statt. Fortgeschrittene und zuverlässigere Wechselrichter werden zu immer günstigeren Preisen angeboten. Dies belegt, dass die Umsetzung in diesem Bereich bereits weit

fortgeschritten ist. Insgesamt können mit der breiten Programmabstützung, besonders aber mit neuen KTI-Projekten und der Erprobung in P+D-Projekten wichtige Beiträge zur Umsetzung geleistet werden.

Ende 2000 dürften in der Schweiz Photovoltaik Anlagen mit einer Leistung von insgesamt rund 15 MWp im Betrieb sein, wovon ca. $\frac{3}{4}$ netzgekoppelt sind. Der Anteil der Inselanlagen beträgt demnach ca. $\frac{1}{4}$ der installierten Leistung und umfasst schätzungsweise 30'000 kleine Inselanlagen. Die Gesamtleistung von 15 MWp ist zwar deutlich vom 50 MWp-Ziel von *Energie 2000* entfernt, entspricht aber immer noch einer der weltweit höchsten installierten pro Kopf Leistungen. Ebenso kann eine kontinuierliche Kostenreduktion festgestellt werden.

Bewertung 2000 und Ausblick 2001

Das Jahr 2000 stand zweifellos im Zeichen der eidgenössischen Abstimmungen vom 24. September 2000, geprägt von grossen Hoffnungen vor der Abstimmung und entsprechender Enttäuschung nach dem negativen Ausgang. Für die im vorliegenden Bericht diskutierte Forschung, Entwicklung und Demonstration hat der Ausgang dieser Abstimmungen keinen unmittelbaren Einfluss; an der Notwendigkeit einer anhaltenden Forschung und Entwicklung bestanden grundsätzlich von keiner Seite Zweifel. Die finanziellen Mittel sollten demzufolge in derselben Grössenordnung vorliegen oder zu mobilisieren sein wie bisher. Angesichts einer weiterhin angespannten Finanzlage ist eine breite Programmabstützung jedoch unabdingbar.

Aus technologischer Sicht wie auch aus der Perspektive der Umsetzung kann – wie die aufgeführten Beispiele belegen – das Jahr 2000 als Erfolg gewertet werden. Die Diskussionen und Medienberichte rund um die Abstimmungen sowie ein wachsendes Bewusstsein des weltweiten Marktwachstums der Photovoltaik hatten in vielen Kreisen eine erhöhte Beachtung zur Folge. Konkretes Interesse konnte aus Industrie und Finanzkreisen (Banken, Investoren) verzeichnet werden. Dies belegt die internationale

Bedeutung der Photovoltaik auch in der Schweiz.

Eine hohe Präsenz der Schweizer Photovoltaik erfolgte an der 16. Europäischen Photovoltaikkonferenz in Glasgow [38]. Die Nationale Photovoltaiktagung, welche im Berichtsjahr in Neuchâtel [39] stattfand, konnte ihrerseits die vielfältigen Aspekte rund um die Photovoltaik aus Schweizer Sicht belegen und wird als Treffpunkt allgemein sehr geschätzt.

Für 2001 kann erwartet werden, dass die Schweizer Photovoltaik nicht stehen bleibt: Interessante Entwicklungen sind seitens der Industrie zu erwarten, die internationale Ausrichtung wird noch weiter ausgebaut werden und der Markt dürfte aufgrund der weiteren Verbreitung der Solarstrombörsen mindestens im bisherigen Umfang bestehen bleiben. Die Entwicklung wird damit insgesamt nicht so schnell vor sich gehen wie erhofft aber sie geht zweifellos in die gewünschte Richtung. Der Informationsaustausch soll mit thematischen Workshops vertieft werden. Um dem zunehmenden Informationsbedürfnis gerecht zu werden, wird zudem eine der Photovoltaik gewidmete, umfassende website www.photovoltaiic.ch aufgeschaltet.

Liste der Projekte und Internetseiten

(JB) Jahresbericht 2000 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

- [1] A. Shah, IMT, UNI-Neuchâtel: *Technologische Weiterentwicklung der mikromorphen Solarzellen* (JB) ♦ *Feasibility Study Micromorph Solar Cell* (SB) ♦ *Integration of Antennas with Solar Cells (SOLANT)* (JB) / <http://www-micromorph.unine.ch>
- [2] Ch. Hollenstein, CRPP / EPFL-Lausanne: *Large area and high-throughput coating system (PECVD) for silicon thin-film solar cells* (JB)

- [3] D. Fischer, 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] J. Gobrecht, PSI-Villigen: *Entwicklung von low-bandgap photovoltaischen Zellen* (JB) / <http://www.psi.ch/LMN>
- [5] H. Zogg, IQE, ETH-Zürich: *LACTEL (Large area cadmium telluride electrodeposition for thin-film solar cells)* (JB) ♦ *WIDE GAP CPV (Wide gap chalcopyrites for advanced PV devices)* (JB) ♦ A.N. Tiwari: *CADBACK (The CdTe thin film solar cell - improved back contact)* (JB) *FLEXIS (CIS thin film solar cells on flexible substrates)* (JB) / <http://www.tfp.ethz.ch/>
- [6] M. Grätzel, ICP2 / EPF-Lausanne: *Cellules solaires basées sur des films semiconducteurs nanocristallins colorés* (JB) ♦ *Freiluft - Messungen von Solarzellen neuer Technologie* (JB) / <http://dcwww.epfl.ch/icp/ICP-2/icp-2.html>
- [7] T. Meyer, SOLARONIX, Aubonne: *LOTS-DSC (Longterm stability of dye-sensitized solar cells for large area power applications)* (JB) / <http://www.solaronix.ch/>
- [8] G. Calzaferri, UNI-Bern: *Photochemical and photoelectrochemical transformation and storage of solar energy* (JB) / <http://iacrs1.unibe.ch>
- [9] Ch. Roecker, LESO / EPF-Lausanne: *PV en Face* (JB)) ♦ *DEMOSITE and DEMOSITE FLAT ROOFS – Phase III* (SB) ♦ *DEMOSITE and DEMOSITE FLAT ROOFS – Phase IV* (JB) ♦ *Capteur hybride d'une nouvelle génération* (JB) / <http://lesomail.epfl.ch/>
- [10] R. Neukomm, Atlantis – Bern: *HIPERB (High performance photovoltaics in buildings)* (JB) ♦ A. Eckmanns: *PHOTO-VENT: Development of PV-powered smart natural ventilation devices* (JB) / <http://www.atlantisenergy.com/>
- [11] G. Travaglini, LEEE, SUPSI - DCT, Canobbio: *TISO 2000 – 2002: Qualità e resa energetica di moduli ed impianti fotovoltaici* (JB) ♦ *MTBF_PVm (Mean time before failure of photovoltaic modules)* (JB) / <http://leee.dct.supsi.ch>
- [12] H. Häberlin, HTA-Burgdorf: *Qualitätssicherung von PV-Anlagen* (JB, SB) ♦ *Langzeitverhalten von netzgekoppelten PV-Anlagen 2* (JB) ♦ *PV-EMI (Development of standard test procedures for electromagnetic interference (EMI) tests and evaluations on PV components and plants)* (JB) / <http://www.hta-bu.bfh.ch/e/pv/pv-indd.htm>
- [13] P. Toggweiler, ENECOLO - Mönchaltorf: *PVSAT: Remote performance check for grid connected PV systems using satellite data* (JB) ♦ *ENERBUILD RTD (Thematic Network: Energy in the built environment)* (JB) ♦ *Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 7* (JB) / <http://www.solarstrom.ch>
- [14] R. Frischknecht, ESU-Services - Uster: *Literaturstudie Ökobilanz Photovoltaikstrom und Update der Ökobilanz für das Jahr 2000* (SB) / <http://www.esu-services.ch>
- [15] H.-J. Mosler, Universität – Zürich: *MSG: Combined project on multi-user solar hybrid grids* (JB)
- [16] P. Hüsser, NOVA ENERGIE, Aarau: *Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 1* (JB) / <http://www.novaenergie.ch/>
- [17] Th. Nordmann, TNC CONSULTING - Männedorf: *Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 2* (JB) / <http://www.tnc.ch>
- [18] M. Viloz, DYNATEX - Colombier: *Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 3* (JB)
- [19] S. Taiana, EWZ - Zürich: *Schweizer Beitrag IEA PVPS Task 5* (JB) / <http://www.ewz.ch/>
- [20] S. Nowak, NET – St. Ursen: *Schweizer Beitrag IEA PVPS Task IX* (JB)
- [21] M. Real, ALPHA REAL - Zürich: *IEC TC 82* (JB) ♦ *PV GAP (PV Global Approval Program)* (JB)

P+D – Projekte (Auswahl)

- [22] H. Kessler, PAMAG - Flums: *3-kWp-PV-Eurodach amorph, Flums* (JB)
- [23] Ch. von Bergen, Sputnik Engineering - Nidau: *LonWorks als Feldbus für PV Anlagen* (JB, Zwischenbericht) <http://www.solarmax.com>
- [24] R. Minder, Minder Energy Consulting - Oberlunkhofen: *SolarCat, solar elektrisch angetriebenes Passagierschiff*. (JB)
- [25] Th. Nordmann, TNC Consulting - Horgen: *PV Anlagen Kantonsschule Stadelhofen* (JB) / <http://www.tnc.ch>

- [26] F. Bigler, Industrielle Betriebe - Interlaken: *PV Dächer Altstadt Unterseen* (JB) / <http://www.ibi-interlaken.ch>
- [27] J. Audergon, GEIMESA - Fribourg: *Système hybride photovoltaïque et thermique de 7 kWp, Domdidier* (JB) / <http://www.geimesa.ch>
- [28] U. Bühler, Energy Systems and Engineering - Cham: *Schrägdach- und Fassaden Montagesystem Alu-Tec/AluVer, 30-kWp-Anlage Hüenenberg* (JB)
- [29] A. Schlegel, awtec AG - Zürich: *Beschichtung von PV Modulen* (JB) / <http://www.awtec.ch>
- [30] Ch. Meier, Energiebüro - Zürich: *GRS, garantierte Resultate bei PV Systemen* (JB, SB) / <http://www.energiebuero.ch>
- [31] S. Kormann, Verein Sonnensegel - Münsingen: *Sonnensegel Münsingen* (JB) / <http://www.solarsail.ch>
- [32] P. Toggweiler, D. Ruoss, Enecolo AG - Mönchaltorf: *SOLRIF; Rahmen für Standardmodule zur direkten Dachintegration* (JB, SB) ♦ *4.8-kWp-P+D-Anlage SOLRIF, Lindenmatt* (JB, SB) / <http://www.solarstrom.ch>
- [33] Ch. Roecker, LESO - EPF Lausanne: *PVSYST 3.0* (JB, SB) / <http://lesomail.epfl.ch>

Referenzen

wenn nicht anders erwähnt, bei der Programmleitung zu beziehen

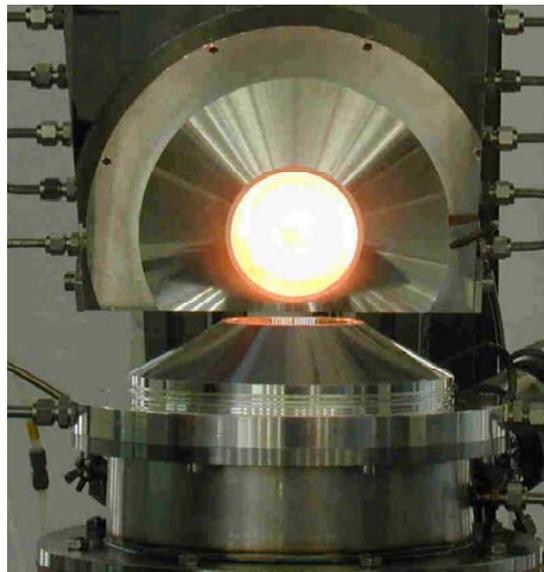
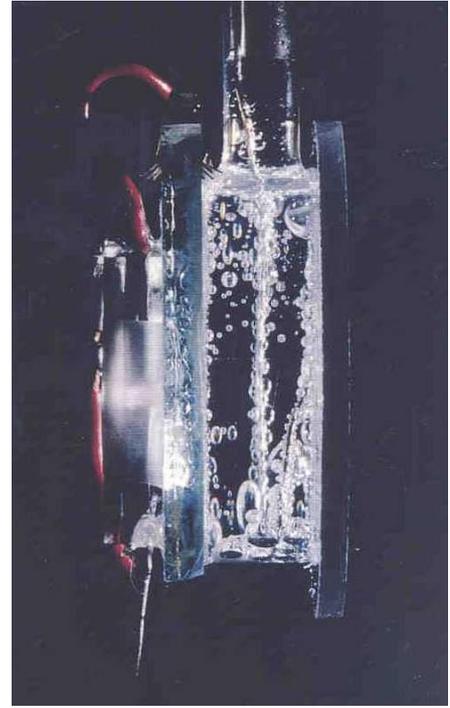
- [34] *Swiss national report on PV power applications 1998*, P. Hüsser, Nova Energie, 2000
- [35] *Trends in Photovoltaic Applications in selected IEA countries between 1992 and 1999*, IEA PVPS Task I – 08: 2000
- [36] *IEA PVPS Newsletter*, zu beziehen bei Nova Energie, Schachenallee 29, 5000 Aarau, Fax 062 834 03 23
- [37] *Literature survey and analysis of non-technical problems for the introduction of building integrated photovoltaic systems*, IEA PVPS Task7-01: 1999
- [38] *16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition in Glasgow – aus Schweizer Sicht*, BFE, 2000
- [39] *Nationale PV-Tagung 2000*, Unterlagen zu beziehen beim VSE, Gerbergasse 5, 8023 Zürich, Fax 01 221 04 42

SOLARCHEMIE / WASSERSTOFF

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 2000

Armin Reller

armin.reller@physik.uni-augsburg.de



Drei geförderte Projekte aus dem Programm Solarchemie/Wasserstoff:

Die Wasserpumpe (Bild oben links), die durch direkte Umwandlung thermischer Strahlungsenergie in mechanische Energie betrieben wird, ist für den Einsatz in sonnenreichen Gebieten bereit. Mit dem neuartigen, durch konzentrierte Solarstrahlung betriebenen Recycling-Reaktor (Bild unten) werden Schwermetalle in Sondermüll bei Temperaturen von 1200 – 1300 °C immobilisiert. In der Tandem-Zelle (Bild oben rechts) wird Wasser mit sichtbarem Licht direkt zu Wasserstoff und Sauerstoff gespalten.

Programm-Schwerpunkte

Das Leitziel des **Programms Solarchemie / Wasserstoff** ist es, regenerative Energieformen – insbesondere direkte Solarstrahlung – effizient, wirtschaftlich und umweltverträglich in technisch nutzbare Prozessenergie, in zukunftsfähige Energieträger wie Wasserstoff, Methanol, etc., oder zur Bereitstellung von Grundchemikalien und Funktionsmaterialien wie Keramiken oder Metalle einzusetzen. Diese Arbeiten müssen zur Reduktion der Nutzung fossiler Energieträger und damit der Kohlendioxidemissionen beitragen. Daraus erwächst die Forderung, dass die zum Einsatz kommenden Materialien und die erzeugten Produkte in eine zukunftsfähige Stoffkreislaufwirtschaft integriert werden können. Es wird auch angestrebt, Kohlendioxid für die Synthese von Produkten mit hoher Wertschöpfung umzuwandeln, d.h. wieder in industriell interessante Produkte zurückzuführen bzw. zu immobilisieren. Es stehen zwei Wege offen: entweder die biologische Regeneration durch Integration von Biomasse oder Biogas in Energiegewinnungsketten, oder aber die direkte chemische Reduktion von CO₂ mit Wasserstoff und weiteren Reduktionsmitteln zu wertschöpfenden chemischen Grundstoffen wie Methanol, Harnstoff, etc..

Die Integration von solaren und/oder regenerativen Prozessen und Produkten in bestehende Energie- und Materialsysteme ist entscheidend. Es kann vorerst nicht davon ausgegangen werden, dass selbsttragende und wirtschaftlich wettbewerbsfähige Lösungen realisiert werden. Die schrittweise Substitution konventioneller Produktionsweisen ist jedoch Erfolg versprechend. Deshalb wird in der Regel versucht, die Projekte in grössere, bestehende Wirkungsketten einzugliedern. Im Idealfall bedeutet dies, Projektpartner aus Hochschule und Industrie so zu koordinieren, dass von der Grundlagenforschung bis zur technischen Umsetzung teilweise in simultanen Vorgängen nachhaltige Verfahren oder Produkte realisiert wer-

den. Oft ist es auch notwendig, technische Verfahren oder Installationen in die Projekte miteinzubeziehen, die vorerst nicht direkt als relevante Bestandteile der Programmstruktur erscheinen. Sie sind jedoch oft unabdingbar oder aber Nischenlösungen mit bemerkenswertem Energiesparpotential.

Die gegenwärtigen internationalen Bestrebungen, regenerative Energie- und Materialsysteme aufzubauen, werden durch die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie geprägt. Die gleichzeitig erforderliche Entwicklung der für diese Technologien notwendigen Funktionsmaterialien und Verfahrenstechniken ist unabdingbar. Im Programm *Solarchemie / Wasserstoff* werden entsprechende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit hoher Priorität gefördert. Dazu gehören die Bereitstellung von Wasserstoff mittels solarthermischer, elektrochemischer und photoelektrochemischer Verfahren, die sichere Speicherung und die effiziente Nutzung, die oft auf neuen, erst zu erprobenden technischen Lösungen beruhen. Auch für diese Zielsetzungen ist die Forderung nach neuartigen geeigneten Funktionsmaterialien von zentraler Bedeutung.

Um den dringend notwendigen Wandel vom bisherigen, vor allem auf Kohlenstoffchemie basierenden Energiesystem zu einer auf regenerativen Energieträgern basierenden, nachhaltigen Energiewirtschaft zu beschleunigen, haben die Erhebung von verlässlichen Daten über bestehende und zukünftige Energie- und Prozesspotentiale, aber auch eine verlässliche Öffentlichkeitsarbeit eine wichtige Funktion. Im Berichtsjahr wurden deshalb vermehrt Bestandesaufnahmen, Studien und Aufbauarbeiten für ein schweizerisches Wasserstoffkompetenzzentrum unterstützt. Die Integration in internationale Aktivitäten, zum Beispiel der entsprechenden IEA- oder EU-Programme wurde ebenfalls fortgeführt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

TIEF- UND MITTELTEMPERATUR-PROZESSWÄRME

Die Bereitstellung von solar erzeugter Prozesswärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus gehört zu den bedeutendsten und jetzt schon realisierbaren, teilweise auch konkurrenzfähigen Verfahren. Im Berichtsjahr konnten die Arbeiten am volumetrischen Receiver **Kerek** abgeschlossen werden [1]. Ziel dieses Projektes war es, keramische Absorbermodule mit hoher thermischer Wirksamkeit für solarthermische Kraftwerke oder Anwendungen in der Hochtemperatursolarchemie zu entwickeln und zu testen. Die schwierigste Aufgabe bestand darin, geeignete Absorbermaterialien als hochtemperaturbeständige Ge-

stricke zu finden. In Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern (PSI, Univ. Basel, EMPA Dübendorf, TTM Niederrohrdorf, Buck Maschinenbau GmbH, D-Bondorf, Univ. D-Erlangen) konnten eine Vielzahl von beschichteten Materialien untersucht und optimiert werden. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse lassen sich nun konkrete technische Umsetzungen planen und Prozesstemperaturen von bis zu 700 °C erzeugen. Ein solares Luftreceiver-Kraftwerk mit den nun identifizierten Funktionsmaterialien, d.h. schwarzen Keramikfasern, kann die Forderungen an eine saubere, regenerative Energiebereitstellung erfüllen.

Die für den **ABSORBER 2000** entwickelten Schichten (Metall / amorpher Kohlenstoff) wurden an der

Universität Basel [2] erfolgreich weiterentwickelt: um eine optimale Selektivität zu erreichen wurden messtechnische Einrichtungen (Spektrophotometrie und Ellipsometrie) in Betrieb genommen und für verschiedene Komposit-Beschichtungsmaterialien wurden die entscheidenden optischen Kenndaten, d.h. Brechungsindices und Extinktionskoeffizienten in einem grossen Wellenlängenbereich bestimmt. Aufgrund derartiger Messreihen lassen sich die für Wärmeabsorber oder für Fensterbeschichtungen optimalen Materialien eruieren. Neben den optischen Eigenschaften sind auch möglichst gute Umweltverträglichkeit und optimales Alterungsverhalten entscheidende Kriterien für den Einsatz in der Praxis. Als vielversprechendstes Material konnte ein titanhaltiges amorphes Siliciumcarbid $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H/Ti}$ hergestellt werden. Es zeichnet sich nicht nur durch ausserordentliche Hitzebeständigkeit und gute Absorptionseigenschaften, sondern auch durch eine bemerkenswerte Alterungs- und Feuchtebeständigkeit aus.

Für **optisch selektive Schichten** wurden Metalloxide und Metallnitride untersucht. Titan-Aluminium-Nitrid-Filme weisen durch kontrollierte Variation der Zusammensetzung gut definierte, selektive Absorptions-, Transmissions- und Reflexionseigenschaften (z.B. für den Einsatz als Sonnenschutz und Wärmespiegel) auf. Bei Metalloxid-Schutzschichten lässt sich durch das gewählte Herstellungsverfahren die Topographie stark beeinflussen. Diese Oberflächenstrukturierung dient einerseits der Optimierung optischer Eigenschaften, andererseits könnte damit der so genannte Lotus-Effekt erzeugt werden: durch eine extreme, reliefartige Mikrostrukturierung der Oberfläche kann eine schmutzabweisende Wirkung erzeugt werden. Leider sind derartige Metalloxidschichten bezüglich Feuchtebeständigkeit noch nicht befriedigend. Es konnte aber gezeigt werden, dass die schon im vergangenen Jahr untersuchten hydrophoben Fluor-Kohlenstoffschichten durch die genannte Mikrostrukturierung der Oberfläche den Lotus-Effekt aufweisen.

Insgesamt konnte die Herstellung, Charakterisierung und gezielte **Funktionalisierung von Materialien** mit spezifischen optischen Eigenschaften sehr stark verbessert und für unterschiedliche technische Nutzungen optimiert werden. Als wichtige Ergänzung der experimentellen Arbeiten wurde eine Studie über thermische Verluste durch Wärmebrücken in Gebäuden durchgeführt. Es wurden die wärmetechnischen Eigenschaften unterschiedlicher Stähle berechnet, die in Armierungen oder als tragende Verbindungselemente eingesetzt werden. Auf der Basis der erhaltenen Kenndaten lassen sich Wärmebrücken berechnen. Daraus können konstruktive Lösungen für energieoptimierte Bauweisen abgeleitet werden.

Eine direkte Umwandlung von thermischer Strahlungsenergie in mechanische Energie wurde mit einer von der Firma BOMIN-SOLAR entwickelten **Wasserpumpe** erfolgreich realisiert (siehe Titelbild), d.h. ein Prototyp fördert bei Direktbestrahlung konstant

Wasser aus einem 60 Meter tiefen Bohrloch [3]. Als technisches Prinzip wurde ein langsam arbeitender Niedertemperatur-Stirlingmotor eingesetzt, mit dem die bei der Hochtemperatur-Version auftretenden grossen Probleme bezüglich Wärmeübertragung, gasdichter Zylinder und Werkstoffdegradation umgangen werden können. Diese Wasserpumpe wurde so ausgelegt, dass sie in entlegenen Gebieten, zum Beispiel ländlichen Gegenden Afrikas oder Asiens, zum Einsatz gebracht werden kann. Zur Zeit wird eine Serienproduktion in Indien angestrebt.

SOLARE HOCHTEMPERATUR-PRODUKTION VON CHEMISCHEN ENERGIETRÄGERN UND TECHNISCH NUTZBAREN MATERIALIEN

Einen Schwerpunkt des Programms bildet die direkte und effiziente Umwandlung von konzentrierter Solarstrahlung in speicherfähige und transportierbare chemische Energieträger oder in technisch nutzbare Materialien. Die entsprechenden Aktivitäten werden – teilweise in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen – am Paul-Scherrer-Institut in Villigen durchgeführt. Die folgenden Prozesse wurden untersucht:

Solare Herstellung von Kalk

Ausgehend von den Erfahrungen und Erkenntnissen aus früheren Forschungsarbeiten wurde zusammen mit dem Industrieunternehmen QUALICAL (Italien) das Projekt **Solares Kalkbrennen** in Angriff genommen [4]. Ziel ist es, mittelgrosse Anlagen zu entwickeln, in denen Muschelkalk oder andere Kalksorten mittels konzentrierter Solarstrahlung gebrannt werden. Das Produkt, gebrannter Kalk, soll für die Bereitstellung von Baustoffen wie Zement oder Mörtel, aber auch in der Nahrungsmittelindustrie und anderen Branchen genutzt werden. Zielsetzung des Projekts ist, eine 500-kW-Solar-Kalkbrennanlage aufzubauen. Da die gegenwärtig verfügbaren Daten jedoch keinesfalls einen derart grossen Scale-up-Schritt erlauben, wird ein Testreaktor mit einem solarthermischen Input von 5 bis 10 kW und Betriebstemperaturen bis 1'300 °C konstruiert. Aus den gemessenen Daten sollen in der Folge mit numerischen Modellen die Betriebsparameter für den 500-kW-Reaktor extrapoliert werden.

Solarthermische Prozesse in der Stoffkreislaufwirtschaft

Im gemeinsamen Projekt der Gruppe Solare Verfahrenstechnik des PSI und der Firmen MGC-Plasma AG, MuttENZ, und RWH-Consult GmbH, Oberrohrdorf, wird die Verfahrenstechnik für die **solarthermische Behandlung von Sondermüll**, d.h. der Immobilisierung von Schwermetallen wie Zink, Blei und Cadmium entwickelt [5]. In einem neuartigen Recycling-Reaktor (siehe Titelbild), der für die carbothermische Reduktion von Metalloxiden konstruiert wurde, gelang es weltweit erstmals, aus stark schwermetallhaltigen Filterstäuben bei einer Prozesstemperatur

von 1'200–1'300 °C metallisches Blei und Zink zu isolieren. Der experimentell erfolgreiche Verlauf soll nun mit *Fluid Dynamics* Modellierungen parametrisiert werden. Aus den Resultaten erhofft man sich verbesserte Kenntnisse der Einflüsse von Temperatur und Gasatmosphären auf den Verlauf der thermischen Reduktion. Es wurden auch schon Vorversuche zur Behandlung von ASR (Automobile Shredded Residue) unternommen.

24-Stunden-Solarkraftwerk

Die an der Australischen Nationaluniversität (ANU) in Canberra durchgeführten Arbeiten am 15 kW_{chem} **Solar Ammonia Power Project SAP-II** (thermochemische Speicherung von Sonnenenergie durch im Kreislauf geführte, reversible Ammoniakspaltung) konnten im Jahre 2000 erfolgreich abgeschlossen werden [6]. Ein Pilotkreislaufsystem mit einer solaren Speicherleistung von nominal 12 kW_{chem} und einer Wärmeauskoppelung von bis zu 10 kW_{th} wurde im Solarlabor der ANU ausgiebig getestet. Als Hauptresultate gelten das einwandfreie Betriebsverhalten des Solarreaktors durch stationäre sowie transiente Solarwetterverhältnisse, die Bestätigung, dass solarchemische Nettoenergiespeicherraten von circa 75% erreicht werden können und dass die Maximierung der Wärmeauskoppelung im Rohrbündelsynthesereaktor, welcher vergleichbaren, industriellen adiabaten Reaktoren leistungsmässig gleichwertig ist und deshalb durch solche erfolgreich ersetzt werden kann. Abgesehen von zwei kleinen Teilerfolgen konnte bis heute die Finanzierung von SAP-III, einer vorkommerziellen, modularen 300-kW_{chem}-Demonstrationsanlage, noch nicht gesichert werden.

Auf dem Weg zu solaren Brennstoffen

Die als Schwerpunkt der Solarenergieforschung am PSI untersuchten Reduktions-Oxidations-Prozesse in Metalloxiden zur Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff sowie zur Herstellung wertschöpfender Produkte wie Metalle oder Metalloxide aus den entsprechenden Erzen wurden mit einem breiten Spektrum von Teilprojektarbeiten weiterverfolgt [7,8,9]. Für den **Zinkoxidzyklus** wurden vor allem grundlagenwissenschaftliche Studien ausgeführt, deren Ziel die umfassende Aufklärung der einzelnen Prozessschritte von thermochemische oder carbothermische Reduktion sowie Reoxidation ist. Obwohl experimentell die Reduktion von Zinkoxid sowie die Wasserspaltung zur Bildung von Wasserstoff schon untersucht wurde (siehe Jahresberichte 1998, 1999), sollten weitere Grundlagenstudien, die für eine optimale, effiziente Prozessführung entscheidenden Kenngrößen liefern. Dazu gehörte die Planung einer Laser-gestützten Messmethode für den Nachweis von Sauerstoffatomen, die aus dissoziierenden Zinkoxidproben austreten. Der Aufbau dieses Experiments ist sehr aufwendig und ambitiös. Erste Resultate sind im Verlauf des kommenden Jahres zu erwarten.

Als zweites System für eine solarthermische Wasserspaltung mittels Metalloxid-Redoxprozessen wurden

die seit geraumer Zeit bearbeiteten **Eisenoxid- und Eisenmischoxidphasen** weiter spezifiziert. Es zeigte sich, dass ein vereinbarter Meilenstein – die thermische Reduktion eines Eisenoxids in Luft bis zu einem Umsatzgrad von 70% – erreicht werden kann, dass aber die erforderlichen Temperaturen bzw. Energieflussdichten im verfügbaren Reaktor (System TREMPER) nicht erreicht werden können. Auch die Untersuchungen an Eisenmischoxiden, insbesondere Eisen-Cobalt-Oxiden führten nicht zu entscheidenden Durchbrüchen. Während der thermischen Reduktion treten Teilmischungen auf, sodass die reduzierten Proben bei der Wasserspaltung deutlich geringere Wasserstoff-Ausbeuten liefern. In Anbetracht der schwierigen verfahrenstechnischen Probleme wurde entschieden, die solarthermische Reduktion von Eisen- und Eisenmischoxiden nicht mehr als Schwerpunktthema weiter zu bearbeiten.

Die solarthermische Reduktion von **Eisentitanoxiden**, d.h. die Gewinnung von Eisen und Titanoxiden aus dem reichlich vorhandenen Mineral Ilmenit wurde in Methan- und in Wasserstoff-Atmosphäre durchgeführt. Es zeigte sich, dass in Methanatmosphäre durchaus gute Reduktionsumsätze erzielt werden können (aus thermodynamischen Gründen besser als in Wasserstoff), dass sich aber neben erwünschtem Eisen- und Titandioxid auch Titancarbid und Titanoxycarbid als unerwünschte Nebenprodukte bilden. Die Reduktion mit graphitischen Kohlenstoffzuschlägen führte ebenfalls zur Titancarbidbildung. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Auslegung und den Bau eines Solarreaktors, in dem natürliche Ilmenit-Erze reduziert werden sollen. Sollte dieses Experiment gelingen, so hätte man eine neuartige Methode zur umweltschonenden Herstellung von Eisen und Titandioxid zur Verfügung. In Anbetracht der heute eingesetzten, hochenergetischen, chemisch anforderungsreichen und mit grossen Nebenprodukten behafteten industriellen Titan-dioxidproduktion wäre das eine sehr attraktive Variante.

Die **Modellierung** solarchemischer Reaktionen wurde im Rahmen einer Dissertation weiterentwickelt. Dabei wurde ein mathematisches Modell für die Ablation eines Zinkoxidstabes in einem Strahlungsfeld hoher Energiedichte aufgestellt. Erste Befunde über die Ausbreitung der Wärmestrahlung in festen Materialien konnten gewonnen werden. Es stellten sich aber ganz fundamentale Fragen bezüglich der getroffenen Annahmen (Zitat: "Zentral ist die Frage, inwiefern Licht als thermodynamisches System aufgefasst werden kann."), sodass zur Zeit noch keine verlässlichen Parameter für die verfahrenstechnische Optimierung solarchemischer Prozesse prognostiziert werden können.

Die für eine gut kontrollierbare Prozessführung notwendigen **Messtechniken** konnten weiter verbessert werden: mit dem Reflektometer liessen sich Kenndaten wie Oberflächentemperatur im Bereich von Raumtemperatur bis über 2'000 °C sowie die spek-

trale hemisphärische Reflektivität der eingesetzten Metalloxide bestimmen. Als Hochtemperatur-Bezugssystem wurde Zirkonoxid eingesetzt. Es konnte gezeigt werden, dass mit der neuen Laser-Apparatur die Oberfläche dieses Materials angeschmolzen werden kann, d.h. Temperaturem von über 2'500 °C erreicht wurden. Aus den ebenfalls registrierten Reflexivitäten von Zinkoxid konnten wichtige Einflussparameter wie Oberflächenbeschaffenheit oder teilweise einsetzende Reduktionsprozesse im Detail charakterisiert werden. Insgesamt liefern die verfügbaren Messmethoden wichtige, mindestens halbquantitative Kenndaten der Materialeigenschaften der für solarchemische Prozesse relevanten Metalloxide.

Mit dem Laboratorium für optische Materialeigenschaften der Russischen Akademie der Wissenschaften wurde eine Zusammenarbeit zur Messung der thermischen Leitfähigkeit, einer weiteren wichtigen Materialkenngrösse, von Zinkoxid vereinbart. Zusammen mit den experimentellen Befunden lassen sich die während Reduktion und Reoxidation ablaufenden Prozessschritte bedeutend besser charakterisieren und modellieren.

Schliesslich wurde das am PSI entwickelte Temperaturmesssystem FAMP weiter verbessert, sodass es jetzt zur zuverlässigen Temperaturmessung für Sonnenöfen eingesetzt werden kann. Inwiefern dieses Gerät auch für Anwendungen ausserhalb der Solartechnik eingesetzt werden kann, wird zur Zeit mit einem Industrieunternehmen abgeklärt.

Solarchemische, katalysierte Produktion von Kohlenstoff-Nanotubes

Kohlenstoff-Nanotubes, eine immer noch intensiv untersuchte Kohlenstoffmodifikation mit Potential für die **Speicherung von Wasserstoff**, wurden im Sonnenofen von Odeillo, Frankreich, hergestellt [10]. Begleitende Untersuchungen im Labor ergaben relevante Hinweise auf den Mechanismus der durch Metall- oder Metalloxid-Nanopartikel katalysierten Bildung. Es wurde des weiteren untersucht, welche Kohlenstoffquellen – zur Auswahl stehen Acetylen, Kohlenwasserstoffe oder Kohlenmonoxid – unter reproduzierbaren Bedingungen zu optimalen Produkten umgesetzt werden können (siehe auch Projekt [16]).

Fazit

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Solarthermochemie-Gruppe des PSI erbrachten einige bemerkenswerte Fortschritte. Probleme ergaben sich jedoch bei der Rekrutierung von neuen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die eine Diplom- oder Doktorarbeit ausführen möchten. Diese Problematik betrifft nicht nur die Solaranlagen des PSI. In Frankreich und Deutschland leiden die ähnlich orientierten Forschungsarbeiten unter der selben Beeinträchtigung.

PHOTOELEKTROCHEMISCHE SPALTUNG VON WASSER

In dem zwischen der Universität Genf [11], der EPFL Lausanne [12] und der Universität Bern [13] laufenden Verbundprojekt zur **photochemischen Spaltung** von Wasser mit der so genannten **Tandemzelle**, welche mit zwei gekoppelten Photosystemen arbeitet, konnten weitere Fortschritte erzielt werden. Diese Zelle erlaubt die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mit sichtbarem Licht. Das eine von zwei Photosystemen basiert auf einer dünnen, polykristallinen Wolframtrioxid-Schicht, die den blauen Spektralanteil der Solarstrahlung absorbiert, den Sauerstoff des Wassers oxidiert und Elektronen in das zweite, den grünen und roten Spektralbereich absorbierende Photosystem einspeist. Dieses zweite Photosystem besteht aus einem nanokristallinen Titandioxidfilm, auf den ein Sensibilisator-Farbstoff aufgebracht ist. Die erzeugte Photospannung liefert die Leitungsband-Elektronen zur Erzeugung von Wasserstoff. Für die Optimierung wurden insbesondere Verbesserungen der Anoden- und Kathodenmaterialien erzielt, d.h. deren Bandstrukturen wurden durch mikroskopische Strukturierung (dünne Schichten mit optimierten Absorptionseigenschaften) und durch Dotierungen gezielt den Erfordernissen angepasst.

Ein ausgeklügeltes Herstellungsverfahren und die Dotierung mit Wolframdisulfid erlaubte es, den spektralen Absorptionsbereich der Wolframtrioxid-**Photoanode** zu erweitern. Die durch die Dotierung bedingte leichte Abnahme des Photostroms wird aber durch die höhere Absorption im längerwelligen Bereich mindestens in Bezug auf praktische Anwendungen kompensiert. Es konnte auch gezeigt werden, dass auf leitfähigem Glas aufgebraute Wolframtrioxidsschichten mit einer Schichtdicke von etwa 0.5 µm elektrochrome Eigenschaften aufweisen. In ergänzenden Arbeiten wurde versucht, auf der Basis von transparentem Eisenoxid effiziente Photoanoden herzustellen, obwohl aus der Literatur bekannt war, dass deren Photostrom-Wirkungsgrade aufgrund starker Rekombination der Ladungsträger vergleichsweise gering sind. Auch für dieses System wurden neue Synthesewege entwickelt: Sray-Pyrolyse und thermische Zersetzung geeigneter Vorläufer-Verbindungen. Durch Dotierungen mit Fremdmetallkationen, insbesondere mit Titan und durch die Optimierung des Schichtaufbaus gelang es trotz der genannten Einschränkungen, auch im spektralen Absorptionsbereich oberhalb 500 nm noch Photoströme zu messen. Somit stehen nun zwei vielversprechende, günstige und reproduzierbar herzustellende Photoanoden-Materialien zur Verfügung.

Für die auf Titandioxid basierende **Kathode** wurde ein Phthalocyanin-Sensibilisator-Farbstoff entwickelt, der eine erhebliche Erweiterung der spektralen Empfindlichkeit in den nahen Infrarot-Bereich hinein aufweist und über eine bemerkenswerte chemische Stabilität verfügt. Damit lassen sich Stromdichten im Bereich von 20 mA/cm² erzielen, d.h. hohe Photoströme

erzeugen. Als Alternative zu den Metalloxid-Elektroden-Materialien wurde das Silber/Silberchlorid-system im Detail charakterisiert. Es konnte gezeigt werden, dass Silber/Silberchloridschichten, die elektrochemisch auf leitfähige Glasträger aufgebracht wurden, in Gegenwart von photokatalytisch aktiven Silberionen Wasser zu oxidieren vermögen. Die dabei entstandenen Silbercluster konnten mit einer geeigneten Polarisationsspannung quantitativ zu Silberionen oxidiert werden. Die Silbercluster wirken aber auch als Lichtabsorber, was für das spektrale Absorptionsvermögen des Systems bis in den sichtbaren Bereich entscheidend ist. Nun sollen geeignete Photokathoden-Systeme gesucht werden, deren Kante des Valenzbandes ein tieferes Energieniveau aufweist, als die Unterkante des Potentialbereichs der oben genannten Silbercluster. So könnte das Anlegen einer äusseren Spannung für die Oxidation der Silbercluster elegant umgangen werden. Halbleitersysteme, die diese Anforderungen erfüllen, sind bekannt. Die Menge an Sauerstoff, die mit dem Silber/Silberchloridsystem erzeugt werden kann, hängt naturgemäss von der bestrahlten Oberfläche ab, d.h. der Anzahl Photonen, die mit dem Photoanodenmaterial in Wechselwirkung treten können. Für die Vergrösserung der Oberfläche wurden einerseits die Kanäle von Zeolith A, andererseits strukturierte Glasoberflächen mit dem Photoanodenmaterial belegt. Als *spin-off* der Beladung von Zeolith A mit Silber/Silberchlorid konnte gezeigt werden, dass die in unterschiedlichen Positionen des Zeolith-Gitters immobilisierten Silberionen als Farbzentren wirken und gezielt als unterschiedlich gefärbte Systeme eingesetzt werden können. Ausgehend von diesen Erkenntnissen konnten erstmals bedingt durch Grössenquantisierungseffekte farbige und lumineszierende Silbersulfidcluster mit definierter Geometrie (limitiert durch die nanoskopischen Hohlräume in der Zeolithstruktur) stabilisiert werden.

Das der natürlichen Photosynthese in Blättern nachvollzogene Konzept der **Dünnschicht-Antennen-Solarzellen** wurde erfolgreich weiterentwickelt: es gelang, lumineszierende Farbstoffe in die Kanäle von Zeolith L Mikrokristallen einzubauen, die ihrerseits in kristallographisch definierter Ausrichtung als Mono-Mikrokristallschicht auf einem geeigneten Substrat angeordnet werden können. Dieses Komposit-System ist in der Lage, als funktionales Antennensystem Licht zu absorbieren, strahlungslos über viele Moleküle an vorgegebene Stellen molekularer Dimension zu transportieren und ebenfalls strahlungslos auf einen Akzeptor zu übertragen. Es wurde eine Reihe von neutralen und kationischen Farbstoffen hergestellt und charakterisiert. Da die Präparationsmethode für eine breite Palette von Chromophoren angewendet werden kann, lassen sich Funktionsmaterialien jeder Farbe in Absorption und Emission, d.h. vom ultravioletten über den sichtbaren bis zum infraroten Spektralbereich, gezielt herstellen.

HERSTELLUNG, SPEICHERUNG UND NUTZUNG VON WASSERSTOFF

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur zukunfts-fähigen Bereitstellung, Speicherung und Nutzung von Wasserstoff bilden einen Schwerpunkt des Programms *Solarchemie / Wasserstoff*. Die rein grundlagenwissenschaftlichen Projekte wurden in den vergangenen Jahren mehr und mehr durch praxisorientierte, zum Teil mit Industriepartnern durchgeführten Aktivitäten abgelöst. Es wurde auch verstärkt der Tatsache Rechnung getragen, dass Wasserstoff nicht nur als potentieller zukünftiger Energieträger, sondern vor allem als "chemischer Grundstoff" genutzt werden kann. Durch eine Studie konnte klar belegt werden, dass der grösste Teil des weltweit produzierten Wasserstoffs für die Aufbereitung von Erdölprodukten genutzt wird. Trotzdem wird das Ziel verfolgt, Nischenanwendungen der Wasserstoffnutzung zu identifizieren und zu fördern sowie bestehende Nutzungsmöglichkeiten zu verbreitern.

Nutzung

In Anbetracht der zahlreichen öffentlichen Stellungnahmen zur zukünftigen Bedeutung des Wasserstoffs in einer nachhaltigen Energiewirtschaft muss klar gestellt werden, dass es sich um einen sekundären Energieträger handelt, der schwer handhabbar ist und dementsprechend grosse Umwälzungen der gesamten technischen Infrastruktur erfordert. Dies gilt insbesondere für die Materialien, Verfahren und Sicherheitsvorkehrungen, welche erfüllt werden müssen. Oft stellt gerade dieser Sachverhalt das grösste Hindernis zu einer rascheren Implementation von Wasserstofftechnologien dar: Diese zukunfts-fähige Technologie ist (noch) zu teuer und gegenüber den weniger nachhaltigen, jedoch breit und günstig verfügbaren Energieträgern nicht wettbewerbsfähig. Dieser Sachverhalt war Ausgangspunkt für den Start des Aufbaus eines schweizerischen **Wasserstoffkompetenzzentrums, HYDROPOLE**, dessen Ziel es ist, die bestehenden Kompetenzen für eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft zu erfassen, fehlende Kompetenzen zu identifizieren und daraus neue Forschungsaufträge oder aber internationale Allianzen mit entsprechenden Kompetenzzentren aufzubauen [14].

Herstellung

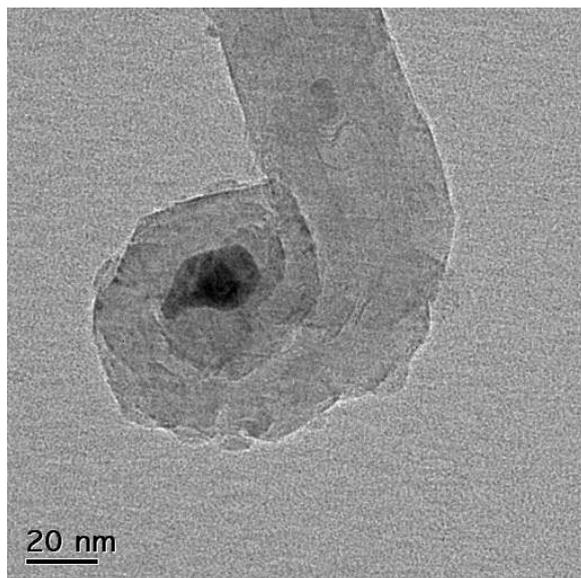
Über die solarthermochemische bzw. photoelektrochemische Herstellung von Wasserstoff wurde in dem vorangegangenen Kapitel ausführlich berichtet. Die Technologie der industriell betriebenen elektrolytischen Wasserstoffproduktion ist zumindest in der Schweiz auf einem international wettbewerbsfähigen Niveau (Hochdruckelektrolyse, Djévahirdjian SA, Monthey). Die biologische Wasserstoffproduktion wird im Rahmen des Programms nicht erforscht.

Zusammen mit dem Programm *Biomasse* wurde ein Projekt in die Wege geleitet, das die über einen Redox-Kreisprozess laufende **Erzeugung von reinem Wasserstoff aus dem Rohgas eines Holzvergasers**

untersucht [15]. Mit den in der Hochtemperatur-Solarchemie-Forschung erworbenen Kenntnissen des Reaktionsverhaltens von Metalloxiden in unterschiedlichen Atmosphären wurde eine Prozessstrategie mit geeigneten verfahrenstechnischen Einrichtungen entworfen, die es erlaubt, aus Biomasse mit optimalem Wirkungsgrad Wasserstoff zu erzeugen. Diese Technologie ist für eine dezentrale und regenerative Wasserstoff-Produktion zukunftsweisend.

Speicherung

Für die Speicherung von Wasserstoff wurde weiterhin nach geeigneten Materialien gesucht: an der Universität Genf [16] Metallhydride, an den Universitäten Fribourg [17] und Augsburg [10] nanoskopische Kohlenstoffphasen. Die seit mehreren Jahren laufenden Bestrebungen, günstige und unter Betriebsbedingungen reproduzierbar funktionierende **Metallhydridspeicher** zu finden, führten zur Entdeckung und Charakterisierung einer Vielzahl neuer, grundlagenwissenschaftlich höchst interessanter Phasen. Die meisten dieser teilweise hohe Wasserstoffspeicherkapazitäten aufweisenden Verbindungen erfordern für die Desorption zu hohe Temperaturen.



Aufnahme einer **Kohlenstoff-Nanotube** mit high resolution transmission electron microscopy

Die noch vor einem Jahr bestehenden hohen Erwartungen in das Speichervermögen der **Kohlenstoff-Nanotubes** wurden (noch) nicht erfüllt (Bild oben). Es zeigte sich, dass die Herstellungsparameter dieser sehr interessanten Kohlenstoffmodifikation noch nicht genau genug spezifiziert werden konnten. Messungen an halbwegs reinen Materialien erbrachten ernüchternde Resultate bezüglich Speicherkapazität. Trotzdem kann die Frage nach dem zukünftigen Potential derartiger Strukturen noch nicht abschliessend beantwortet werden.

Um die als Erdgas-Speicher für den mobilen Einsatz erfolgreich produzierten und in Verkehrssystemen eingesetzten **Kohlefaserkomposit-Druckgasfla-**

schen auch für Wasserstoff funktionstüchtig zu machen, wurden weitere Studien über die zuverlässige Abdichtung durchgeführt. Vor kurzer Zeit wurde ein Patent eingereicht, in dem eine technisch gangbare Lösung beschrieben wird. Zusammen mit dem Tankhersteller ULLIT SA, Frankreich, sollen in dem zur Zeit entstehenden Prüfstand am European Commission Joint Research Centre in Petten (Niederlande) die notwendigen Tests durchgeführt werden. Als Resultat dieser Arbeiten wird ein serienmässig produzierbarer, den Sicherheitsstandards genügender Wasserstoffspeicher erwartet, der auch für schnelle Befüllungen problemlos eingesetzt werden kann.

SYNTHESEN MIT UND IN KOHLENDIOXID

Die an der ETH Zürich laufenden Untersuchungen des **Potentials von Kohlendioxid als Grundchemikalie** einer immer breiter werdenden Palette von wichtigen organischen Verbindungen verliefen sehr erfreulich [18]. Es konnte gezeigt werden, dass in technisch genutztem *Überkritischem Kohlendioxid* eine Reihe von katalysierten Reaktionen durchgeführt werden können, die unter konventionellen Bedingungen nicht oder nur in geringem Masse ablaufen. Als sehr bemerkenswertes Resultat muss die durch neuartige Rutheniumkatalysatoren unterstützte Synthese von Carbamaten hervorgehoben werden. In der Industrie wird heute dazu weltweit das sehr giftige Phosgen als Kohlenstoffbaustein verwendet. Es konnte jetzt gezeigt werden, dass *Überkritisches Kohlendioxid* zwei Funktionen erfüllen kann: einerseits als Kohlenstoff-Baustein, andererseits als Lösungsmittel. Es steht somit ein eleganter, Phosgen- und im Prinzip Lösungsmittel-freier Syntheseweg für diese wichtige Substanzklasse zur Verfügung. Auch für die partielle Oxidation von Alkoholen mit Luft zu den entsprechenden Ketonen und Aldehyden wurden in *Überkritischem Kohlendioxid* mit geeigneten Katalysatoren hohe Ausbeuten und eine hohe Selektivität erzielt. Schliesslich konnte in Gegenwart eines Ruthenium-Katalysators – ausgehend von Diethylamin, Kohlendioxid und Wasserstoff – direkt *N,N*-Diethylformamid hergestellt werden. Dieses Verfahren soll die Lösungsmittel-freie katalytische Synthese von Ameisensäurederivaten zu einer vielseitig verwendbaren Synthesemethodik machen.

MATERIALWISSENSCHAFTLICHE UND VERFAHRENSTECHNISCHE ENTWICKLUNGEN

Als Ergänzungen zu bestehenden Entwicklungen wurden materialwissenschaftliche und verfahrenstechnische Projekte initiiert und zu einem guten Teil realisiert. Obwohl sie inhaltlich zumindest teilweise nicht als Kernthemen des Programms *Solarchemie / Wasserstoff* betrachtet werden können, sind sie doch für das Auffinden von neuen Technologien über das Erkennen neuer Trends bis hin zu Zukunftsperspekti-

ven, und damit für eine vorsorgende Entwicklung der Programmstruktur durchaus relevant. In der Folge werden diese Projekte kurz präsentiert.

Alternative Antriebssysteme

Die Wandlung Druckluft – Mechanische Energie – Druckluft kann trotz der vergleichsweise geringen Speicherdichte des Speichermediums Druckluft für viele Anwendungen wie Pumpensysteme oder auch mobile Einheiten sehr attraktiv und dank minimaler Umweltbelastung nachhaltig sein. Ein wichtiges Problem besteht darin, dass bei den Energieumwandlungen ein möglichst hoher Wirkungsgrad erzielt werden muss. Im Projekt **quasi-isothermes Füll- und Entladesystem für Hochdruckgasflaschen** wurden wesentliche Fortschritte erzielt, indem Energieumwandlungs- und Steuerungskomponenten gebaut und ersten Tests unterworfen wurden [19]. Es konnte gezeigt werden, dass die gespeicherte Energie durch neuartige technische Lösungen bei Motoren mit hohem Wirkungsgrad zum Einsatz kommen kann. Ein Teil des in diesem Projekt gewonnenen Know-hows konnte auch im Projekt **Solare Wasserpumpe auf der Basis eines Niedertemperatur-Stirlingmotors** der Firma BOMIN-SOLAR erfolgreich umgesetzt werden [20] (siehe Kapitel tief- und mitteltemperatur-Prozesswärme).

Energiesparende Techniken und Sicherheitssysteme

An unterschiedlichen Standorten wurde ein elektrophysikalisches System zur Verbesserung der Wärmeübertragung und des Energieverbrauchs für die **Warmwasserbereitstellung in Solarkollektoranlagen und in offenen Rückkühlkreisläufen zur Kälteerzeugung** erprobt [21]. Dabei konnte gezeigt werden, dass durch den gezielten Einsatz von elektromagnetischen Feldern die Verkalkung von Rohren und Wärmetauschflächen vermindert oder gar verhindert

werden kann. Durch die bessere Wärmeübertragung und die Möglichkeit, anstelle von teilentsalztem Wasser Leitungswasser einsetzen zu können, wurden energetische und wirtschaftliche Einsparungen erzielt.

Um den Einsatz von Kleinwärmepumpen mit Ammoniak als Medium möglichst sicher zu gestalten, wurden im Projekt **AMMOTRAP** weitergehende Studien am Sorptionsmaterial durchgeführt [22]. Es stellte sich heraus, dass nicht die Funktion des Absorbers, sondern dessen bestmögliche Façonierung und Positionierung Probleme bereitet. Trotzdem wird anfangs des kommenden Jahres eine Wärmepumpe mit diesem Sorptionsmaterial als Sicherheitssystem für den Probetrieb ausgerüstet.

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

Über die Forschungs-, Entwicklungs- und Umsetzungsarbeiten des Programms wurde in vielfältiger Weise in Fachzeitschriften, an Konferenzen, an (Fach-)Hochschulen und in Unternehmen berichtet. Es zeigte sich, dass – trotz des durch den Volkentscheid vermittelten Eindrucks – ein grosses Interesse an übergreifenden Zusammenhängen zwischen regenerativen Energiesystemen, Ökonomie und Ökologie besteht. Gerade bei den Vorarbeiten zur Etablierung des Wasserstoffkompetenzzentrums HYDROPOLE [14] wurde die Erfahrung gemacht, dass in vielen Industrieunternehmen die Bereitschaft zur Kooperation und zur Erarbeitung von Zukunftsperspektiven bemerkenswert ist. Dies vor allem, wenn die Energieproblematik direkte Bezüge zu konkreten Prozess- oder Produktoptimierungen aufweisen. Als Grundlage für den Aufbau von HYDROPOLE wurde auch eine **Bestandsaufnahme des weltweiten Wasserstoffverbrauchs** erstellt [23].

Ein **Statusrapport der Brennstoffzellentechnik** wurde angefertigt [24], dessen Resultate baldmöglichst über Internet zugänglich gemacht werden. Weitere wichtige Informationen über Energieträger und deren Nachhaltigkeit wurden von Umweltwissenschaftlerinnen und Umweltwissenschaftlern der Universität Zürich im Rahmen einer Abschlussarbeit mit dem Titel **Alternative Antriebssysteme** zusammengetragen und verglichen [25].

Nationale Zusammenarbeit

Die Vernetzung des Programms *Solarchemie / Wasserstoff* mit den Aktivitäten von anderen Programmen wie *Verbrennung* oder *Biomasse* wurde verstärkt. Die Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen wurde auch für vorerst grundlagenwissenschaftlich orientierte Projekte weiter konkretisiert. Nennenswert sind sicher die Kooperation des Solarchemiegruppe am PSI mit privatwirtschaftlichen Unternehmen, oder die Aktivitäten im Bereich der Hochdruck-Kohlefaser-tanks mit Partnern aus Frankreich, Deutschland und der Schweiz.

Im Verbundprojekt *Photochemische Wasserspaltung* konnten mit dem bewährten "Dreigestirn" (Uni Genf,

EPF Lausanne und Uni Bern) weiterhin beeindruckende Fortschritte erzielt werden. Es konnten Industriekontakte aufgebaut werden, die für eine technische Realisierung der so genannten Tandem-Zelle zur photoelektrochemischen Spaltung von Wasser unabdingbar ist.

Erste Erfahrungen mit dem im Entstehen begriffenen Wasserstoffkompetenzzentrums HYDROPOLE zeigten, dass nun zum Thema Wasserstoff ein effizientes Instrument zur Vernetzung der Aktivitäten und zur Verbreitung der relevanten Informationen zur Verfügung steht.

Internationale Zusammenarbeit

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

- Internat. Leitung des Projekts *Solar Chemistry (SolarPACES)*
- Internat. Leitung des Projekts *Photoproduction von Hydrogen und Case Studies of Integrated Systems* (IEA-Wasserstoff-Programms)

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
- Festkörperchemie, Anwenderzentrum für Material- und Umweltwissenschaften, Wissenschaftszentrum Umwelt, Universität Augsburg
- Solarforschungszentrum Odeillo, Frankreich
- Solar Energy Research Center, The Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel
- Boreskov Institute of Catalysis, Novosibirsk, Russland
- Plataforma Solar de Almería, Tabernas, Spanien
- AG Solar, Nordrhein-Westfalen, Deutschland
- Niedersächsische Energieagentur, Hannover, Deutschland

Bewertung 2000

Im Berichtsjahr konnten die Finanzen so weit konsolidiert werden, dass für das kommende Jahr – bei gleich bleibender Grundfinanzierung – neue Projekte geplant und initiiert werden können. In manchen Bereichen wurden bemerkenswerte Fortschritte erzielt. Die Prozesse, die am Sonnenofen des PSI unter gut kontrollierten Bedingungen gefahren an Modellreaktionen erprobt wurden, liessen sich direkt für technische Problemstellungen wie das Kalkbrennen oder die Entsorgung von Schwermetallen anwenden. Wie vorgesehen sollen diese Prozesse als schon bald wirtschaftliche Nischenanwendungen in die Praxis umgesetzt werden. Die Bereitstellung solarer Brennstoffe muss jedoch weiterhin als langfristige Option betrachtet werden.

Auch die photoelektrochemische Spaltung von Wasser in der Tandem-Zelle konnte vor allem dank materialwissenschaftlicher Verbesserungen optimiert werden. Auch die katalytischen Synthesen organischer

Verbindungen in Überkritischem Kohlendioxid ergaben vielversprechende und zukunftsweisende Resultate.

Durch die Erstellung von Bestandsaufnahmen konnten wichtige Ausgangspunkte für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten definiert werden: so können die Speicherung von Wasserstoff in Kohlefaser-tanks, die industrielle Fertigung von solaren Wasserpumpen oder der Aufbau des Wasserstoffkompetenz-zentrums HYDROPOLE als Beispiele für Projekte mit erheblichem Zukunftspotential bezeichnet werden.

Insgesamt kann für das Jahr 2000 eine recht positive Bilanz gezogen werden. Sollte es gelingen, die laufenden und geplanten Arbeiten weiterhin mit einiger Planungssicherheit unterstützen zu können, so darf für die nächsten Jahre mit einigen auch wirtschaftlich attraktiven Resultaten bzw. Produkten gerechnet werden.

Ausblick 2001

Für das kommende Jahr können einige ganz klare Zielsetzungen formuliert werden: das Projekt HYDROPOLE muss soweit abgeschlossen werden, dass es mit einem hohen Anteil an Eigenfinanzierung die ihm übertragenen Funktionen wahrnehmen kann; die Drucklufttechnologie und die solare Stirling-

Technologie müssen zum Prototypstatus bzw. zur Nullserie-Reife gebracht werden; für das solare Kalkbrennen gilt es, die vorgesehene technische Anlage aufzubauen und zu testen. Die weiteren Projekte werden nach Kräften weitergefördert, bestmöglich koordiniert und vorangetrieben.

Liste der Projekte

(JB) Jahresbericht 2000 vorhanden
(ZB) Zwischenbericht vorhanden
(SB) Schlussbericht

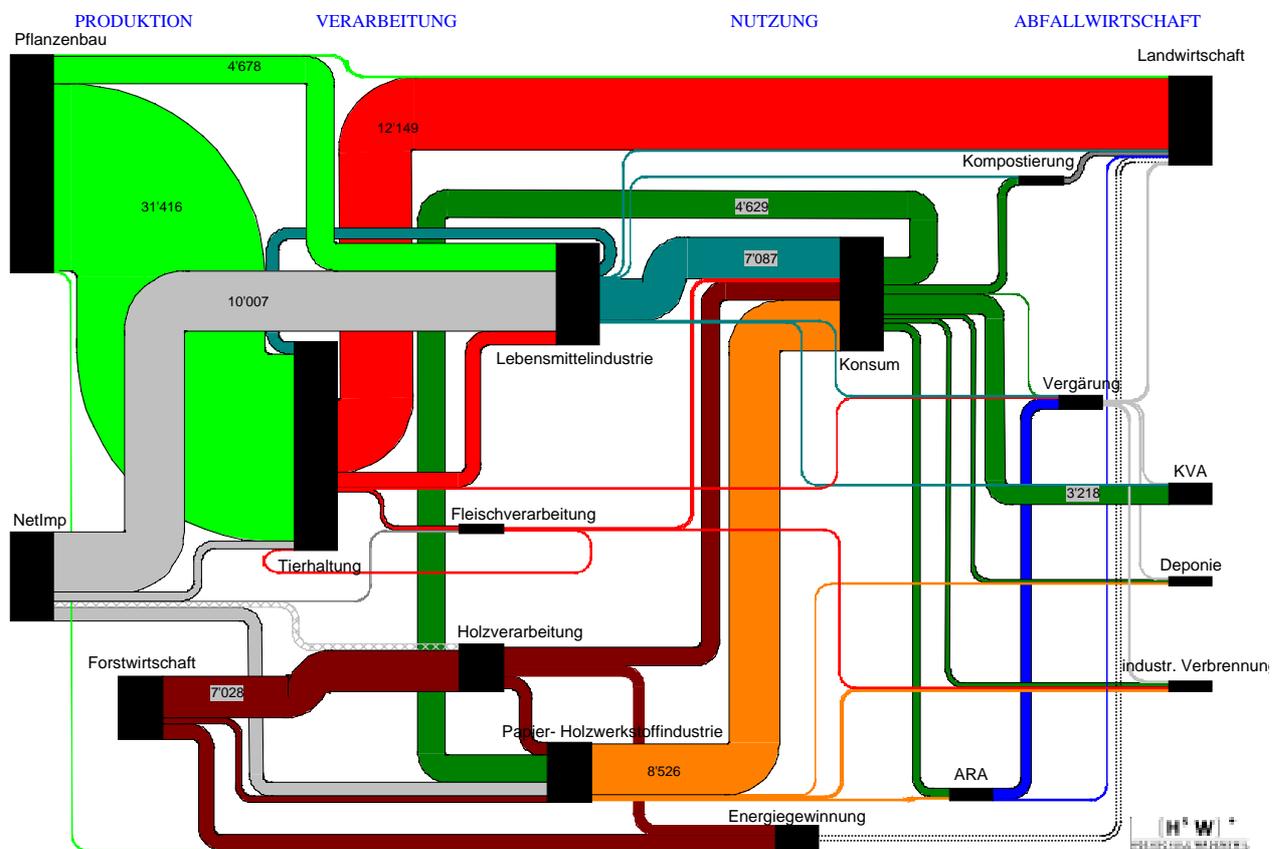
- [1] H. Fricker, *Rickenbach: KEREK, keramisches Absorber-/Receiver-System* (SB)
- [2] P. Oelhafen, J. Geng, A. Schüler, UNI Basel: *Materialien für nachhaltige Technologien in der Energieumwandlung und Energieeinsparung* (JB)
- [3] J. Kleinwächter, BOMIN-SOLAR, D-Lörrach: *Solare Wasserpumpe* (ZB)
- [4] A. Meier, R. Palumbo, A. Steinfeld, C. Wieckert und D. Wuillemin, PSI Villigen, und G. M. Cella, E. Bonaldi, QualiCal: *Solar Production of Lime* (JB)
- [5] A. Steinfeld, ETH Zürich, B. Schaffner, A. Meier D. Wuillemin PSI Villigen, und W. Hoffelner, MGC-Plasma AG, Muttenz und RWH Consult GmbH, Oberrohrdorf: *Solarthermische Prozesse in der Stoffkreislaufwirtschaft* (JB)
- [6] A. Luzzi, Australian National University, Canberra: *15 kW_{chem} Solar Ammonia Power Project SAP-II* (SB)
- [7] I. Alxneit, M. Musella, M. Sturzenegger, H. R. Tschudi, PSI Villigen: *Direkte Umwandlung von konzentrierter Sonnenenergie in chemische Energieträger* (JB)
- [8] A. Steinfeld, PSI Villigen, *Solarthermische Herstellung von Zink* (JB)
- [9] T. Gerber, PSI Villigen: *Darstellung und Spektroskopie von Zinkoxid in der Gasphase* (JB)
- [10] A. Weidenkaff, UNI Augsburg, *Solarchemische Herstellung von Kohlenstoff-Nanotubes* (ZB)
- [11] J. Augustynski, M. Ulmann, UNI Genève: *La photolyse de l'eau et la production d'hydrogène et d'oxygène au moyen de l'énergie solaire* (JB)
- [12] M. K. Nazeeruddin und M. Grätzel, EPFL Lausanne: *Generation of Hydrogen by Water Splitting with Visible Light* (JB)
- [13] G. Calzaferri, UNI Bern: *Photochemische und photoelektrochemische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie* (JB)
- [14] K. Wurr, e3m Hamburg: *HYDROPOLE – Schweizerisches Wasserstoffkompetenzzentrum* (ZB)
- [15] S. Stucki, S. Biollaz, M. Sturzenegger, R. Sime, R. Struis, PSI Villigen: *Redox-Kreisprozess zur Produktion von reinem Wasserstoff aus dem Rohgas eines Holzvergasers* (JB)
- [16] K. Yvon, UNI Genève: *Synthese und Charakterisierung von neuartigen ternären und quaternären Metallhydriden* (JB)
- [17] A. Züttel und L. Schlapach, UNI Fribourg: *Wasserstoff in Kohlenstoffstrukturen und in Metallen* (JB)
- [18] A. Baiker, ETH Zürich: *Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen Kohlendioxid-Quellen* (JB)
- [19] I. Cyphelly, Cudrefin: *Quasi-isothermes Füll- und Entladesystem für Hochdruckgasflaschen* (P+D-Projekt, ZB)
- [20] J. Kleinwächter, BOMIN-SOLAR, D-Lörrach: *Solare Wasserpumpe auf der Basis eines Niedrigtemperatur-Stirlingmotors* (P+D-Projekt, ZB)
- [21] A. Flück und R. Müller, NEK Zürich: *Elektrophysikalisches System zur Verbesserung der Wärmeübertragung und des Energieverbrauchs für die Warmwasserbereitstellung in thermischen Solaranlagen und offenen Rückkühlkreisläufen zur Kälteerzeugung* (JB)
- [22] A. Flück, NEK Zürich und A. Reller, UNI Augsburg: *AMMOTRAP* (ZB)
- [23] K. Wurr, e3m Hamburg: *Die Zukunft von Wasserstoff als Brennstoff* (SB)
- [24] K. Wurr, e3m Hamburg: *Stand der Brennstoffzellentechnik* (SB)
- [25] M. Van Haften, et al., Uni Zürich: *Alternative Antriebssysteme* (SB)

BIOMASSE

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 2000

Martin Rüeegsegger / Daniel Binggeli

martin.rueegsegger@bfe.admin.ch daniel.binggeli@bfe.admin.ch



Biogene Güter in der Schweiz

Das Energieflussdiagramm der biogenen Güter in der Schweiz in GWh (Heizwert unten: H_u); Mittelwert der Jahre 1998-1999.

Programmschwerpunkte

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, Abwasserreinigungsanlagen (ARA) etc. anfallen.

Ziel der BFE-Aktivitäten ist die Förderung einer energetischen Nutzung von Biomasse. Dieser Energieträger soll möglichst ökologisch und ökonomisch eingesetzt werden, um fossile Energieträger zu ersetzen und damit die CO₂-Emissionen zu verringern.

Das Forschungsprogramm Biomasse konzentriert sich vor allem auf die Umwandlung von Biomasse in Wärme, Strom und Treibstoff. Das Programm will mithelfen, dass der Anteil der Biomasse an der schweizerischen Energieversorgung stetig erhöht wird.

Die Schwerpunkte für die Forschung und deren Umsetzung sind gemäss dem *Konzept der Energieforschung des Bundes 2000-2003* definiert. Als Umwandlungstechnologien stehen folgende Prozesse im Mittelpunkt: Verbrennen, Vergasen und Vergären.

Anvisierte Ziele 2000

Die Ziele 2000 lauteten:

- Voraussetzungen für eine Zunahme an Holzheizungen weiter verbessern: energetischer Wirkungsgrad, Abgasemissionen, Qualitätssicherung, Wirtschaftlichkeit (Holz, Altholz);
- die Entwicklung von Holzfeuerungen für Niedrigenergiehäuser und Vergasung verfolgen;
- Know-how für Planung, Bau, Betrieb und Anwendung von industriellen, kommunalen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen erhalten und verbessern;

- die energetische Nutzung der nachwachsenden Rohstoffe aus extensiven Anbauflächen fördern;
- die ökologische und ökonomische Machbarkeit einer energetischen Nutzung von landwirtschaftlichen organischen Abfallstoffen durch Verbrennung in einer Grossanlage untersuchen;
- das Auswerten von bestehenden P+D-Anlagen im Bereich landwirtschaftlicher Co-Vergärung sowie das Unterstützen von Neuinstallationen;
- allgemein vermehrtes Umsetzen der Resultate aus der langjährigen Biomasseforschung durch das Realisieren von P+D-Anlagen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

BIOMASSE UMWANDELN

a) Biomasse verbrennen und vergasen

Ziel der Untersuchung **Praxiserhebung über Stickoxid- und Partikelemissionen automatischer Holzfeuerungen** [1a] ist die statistische Auswertung dieser Daten zur Bestimmung von Emissionsfaktoren und – soweit als möglich – eine Beschreibung der wichtigsten Einflussfaktoren. Aus rund 1000 Einzelmessungen liegen die mittleren NO_x-Emissionen bei rund 220 mg/Nm³ und die Staubgehalte im Bereich von 120 mg/Nm³.

Bei der **Feldmesskampagne Partikelemissionen aus Holzfeuerungen** [8a] werden die typenspezifischen Emissionsfaktoren aus rund 16 repräsentativen Feuerungssystemen im realen Praxisbetrieb ermittelt. Der Brennstoff ist primär Biomasse, vergleichsweise auch Öl und Gas.

Im Projekt **Auslegungsgrundlagen für Holzfeuerungen** [2] wird ein Modell zur Berechnung des Verbrennungsvorgangs in automatischen Holzfeuerungen

erarbeitet, welches zur optimalen Auslegung von Feuerungsanlagen eingesetzt werden kann. Das Berechnungsmodell soll sowohl die Feststoffumsetzung als auch die anschliessenden Gasphasenreaktionen erfassen. Die Modellierung der Feststoffumwandlung ist weitgehend abgeschlossen und wird im Schlussbericht im Jahr 2001 dokumentiert.

Ziel des Projekts **Grundlagen der Aerosolbildung** [1c] in Holzfeuerungen ist die Identifikation der Haupt-Mechanismen für die Bildung von Aerosolen. Weiter soll untersucht werden, wie diese Mechanismen durch die Betriebsparameter einer Holzfeuerung beeinflusst werden. Im Berichtsjahr wurde die Versuchsanlage in Betrieb genommen und erste Versuche durchgeführt.

Das Projekt **Kleinholzfeuerung mit Feststoffspeicher als Alleinheizung** [3] beinhaltet die Entwicklung einer im Wohnbereich integrierten Feuerung für Niedrigenergiehäuser mit naturbelassenem Stückholz. Die entwickelten drei Teile: Wärmeerzeuger-, Speicher- und Verteilsystem wurden zusammengeführt

und als Gesamtsystem überprüft. Der Schlussbericht ist für Sommer 2001 zu erwarten.

Beim laufenden Projekt **Energetische Nutzung von Biomasse** [4] geht es darum, den Hofdünger nach einer geeigneten Aufbereitung teils zu verbrennen, teils in Form von Flüssigdünger aus Gebieten mit konzentrierter Schweinehaltung zu exportieren. Ein Standort für den Bau einer Pilotanlage wurde gefunden und soll nach Einholen aller notwendigen Bewilligungen 2001 realisiert werden.

Ziel der schweizerischer Vertretungen in der **International Energy Agency (IEA), Bioenergy Agreement Task 19 Biomass Combustion** [1b] und **Bioenergy Agreement Task 20 Thermal Gasification** [6] ist ein Erfahrungsaustausch mit den IEA-Mitgliedstaaten über Aspekte der Verbrennung/Vergasung von Biomasse, die Zusammenarbeit auf ausgewählten Gebieten und die Mitwirkung bei der Festlegung zukünftiger Schwerpunkte für Forschung, Entwicklung und Zusammenarbeit.

Grundlagen zur Teerbildung bei der Holzvergasung [9]: Das Projekt beinhaltet das Studium von Massnahmen zur Minderung von Teeren im Produktgas von Holzvergasern. Die Resultate von heterogenen Versuchen zeigen, dass mit dem Laborreaktor die Reaktionsbedingungen für Teere in realen Grossanlagen simuliert werden können.

Mit dem **Redox-Kreisprozess zur Produktion von reinem Wasserstoff aus dem Rohgas eines Holzvergasers** (Redox-Filter) [10] soll ein Verfahren entwickelt werden, welches das teer- und partikelbeladene Rohgas in reinen Wasserstoff umwandelt.

Kontinuierliche Teerbildung bei Holzvergasern mittels FID [7]: Mit der Flammen-Ionisations-Detektion (FID) wurde in diesem Projekt ein neues Messverfahren eingesetzt. Es soll künftig eine gezielte Betriebsoptimierung von Festbettvergasern ermöglichen. Das Projekt wurde im Berichtsjahr abgeschlossen.

b) Biogene Abfälle vergären

Valorisation bioénergétique de fumiers de volailles [11]: Das Projekt evaluiert die technische Machbarkeit der Vergärung von Geflügelmist. Ebenfalls vorgesehen ist die Integration einer Düngerproduktion.

Valorisation énergétique (biogaz) d'huiles comestibles usagées avec différents déchets d'origine agro-alimentaire ("OFEN-HUILES") [12]: In dem Projekt wird die energetische Verwertung von landwirtschaftlichen Abfällen und Ölabbfällen aus dem Lebensmittelbereich mittels einer Pilotanlage (Co-Vergärungsprozess) auf die technische und wirtschaftliche Machbarkeit hin untersucht.

Stand der Technik und Einsatzmöglichkeiten von Membranverfahren bei der Vergärung von Abwässern [13] zeigt die diversen Verfahren, Massen- und Energieflüsse sowie die technischen und ökonomischen Parameter der diversen Technologien.

Co-Vergärung von biogenen Abfallstoffen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen [14]: Ziel des Projekts ist die Ermittlung der wichtigsten co-substrat-abhängigen Dimensionierungs- und Prozessgrößen landwirtschaftlicher Co-Vergärungs-Biogasanlagen. Der Bericht kann an der Forschungsanstalt Tänikon (FAT) bezogen werden.

Ökobilanz von Strom aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen [15]: Ziel dieser Studie ist, die Umweltfreundlichkeit der Stromgewinnung aus landwirtschaftlicher Biogasproduktion zu bestimmen, und damit die Zertifizierungsgrundlagen zu schaffen. Der Schlussbericht wird ab Frühjahr 2001 verfügbar sein.

Das **Prozessverhalten von in der Schweiz eingesetzten MSW-Gärsystemen unter dem Einfluss steigender Anteile an Küchenabfällen** [16] wurde simuliert.

Eine **Übersicht über die Literaturwerte zum Biogasertrag verschiedener Substrate** [17] inklusiv dem "Windows"-Biogasprogramm liegt nun vor. Diese Arbeit ist eine Planungshilfe für die Praxis und kann von Bauherren, Planern und Beratern für die Anlagendimensionierung eingesetzt werden. Daten und Programm sind in elektronischer Form verfügbar; die CD kann über ENET bezogen werden.

Vertretung der Schweiz im **IEA Bioenergy Agreement** [18]: *Energy from Biological Conversion of Organic Wastes*. Ziel ist der Informationsaustausch, die Anregung neuer Projekte und die Erhöhung des Bekanntheitsgrads der anaeroben Vergärung von organischen Abfällen sowie der Gasaufbereitung und -nutzung.

c) Biotreibstoffe

Pflanzenöleinsatz im schnellaufenden, direkteingespritzten PKW-Dieselmotor [19]: Projektziel ist die Eignungsprüfung des von W. Mahler entwickelten Verbrennungssystems für kaltgepresste, naturbelassene Pflanzenöle im schnellaufenden PKW(Ford Escort)- Dieselmotor mit Direkteinspritzung.

Das BFE finanziert gemeinsam mit der KTI eine Untersuchung zur **Gemischtaufbereitung im Brennraum pflanzenölbetriebener direkteingespritzter Dieselmotoren System Mahler** [20]. Mit diesem Projekt will man versuchen, den Mahler-Motor so zu optimieren, dass er zum Vielstoff-Motor wird (zum Thema Pflanzenöl siehe auch P+D-Projekt [39]).

Caractérisation de filières de production de bioéthanol dans le contexte helvétique [21]: Die Untersuchung zeigt ökologische und ökonomische Werte der vier verschiedenen Stoffe: Gras, Magermilch, Altpapier und Rüben.

EINZELPROJEKTE

In der Studie **Rationelle Energieanwendung in der Landwirtschaft / vermehrter Einsatz erneuerbarer Energieträger** [22a] wird der Energieverbrauch

in der schweizerischen Landwirtschaft aus verschiedenen Datenquellen zusammengestellt und miteinander verglichen. Ziel ist es, die **Normierung fester Biomassebrennstoffe** [22b] im Rahmen der laufenden Entwicklung der europäischen Bemühungen zu begleiten und die Interessen der Schweiz zu vertreten.

Messkampagne für eine solare Klärschlamm-trocknungsanlage in Bilten [23]: Diese Messkampagne gehört eigentlich in den Bereich *Rationelle Energienutzung* und/oder in den Bereich *Thermische Solaranlagen*. Diverse Synergien führten das Projekt zur Biomasse. Bei der Anlage in Bilten wird die Abwärme des ARA-eigenen Blockheizkraftwerks (BHKW) sowie Solarenergie genutzt, um dem Schlamm die Feuchtigkeit zu entziehen. Die Resultate zeigen auf, dass dieses Verfahren wirtschaftlich sehr günstig ausfällt und sich als Nachbehandlung und Trocknung von Biomasse nach Vergärungsanlagen generell eignet.

Biogene Stoffflüsse Schweiz [24]: Die Studie zeigt – über die Stufen Produktion, Verarbeitung und Abfälle – die biogene Materialmenge sowie Energieinhalte der verschiedenen Stoffflüsse numerisch und grafisch auf (siehe Titelbild).

Entwicklung eines Mess- und Prüfverfahrens zur Bestimmung von Wirkungsgrad und Emissionen

von Holz-Feuerstätten schwerer Bauart (Speicheröfen) [8b]: Aufgrund der gewonnenen Erfahrung wurde ein Entwurf für ein neues Messverfahren für Speicheröfen ausgearbeitet. Die wichtigsten Punkte im Prüfnormentwurf sind:

- Indirekte Wirkungsgradbestimmung über die Messung der thermischen und chemischen Verluste im Abgas.
- Qualitative Bestimmung der Heizkurve durch ein vereinfachtes Temperaturmessverfahren im Kalorimeterraum. Mit der Heizkurve werden die nominelle Heizdauer und die mittlere Heizleistung des Speicherofens bestimmt.
- Emissionsmessung der gasförmigen Schadstoffe (CO und ggf. Stickoxide, NOx) im Abgas und des Staubs im Verdünnungstunnel.

Mit dem vorliegenden Prüfverfahren wurde eine wichtige Basis für eine Speicheröfen-Prüfnorm gelegt. Bereits konnte dem europäischen Normengremium CEN/TC 295 der Prüfnormentwurf unterbreitet werden. Ein Ausschuss wird das Prüfverfahren weiter evaluieren. Mit der vorliegenden Arbeit war es möglich, aus der Schweiz rechtzeitig mit Unterlagen für neue Normengrundlagen aufwarten zu können.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Aktivitäten im Rahmen des IEA Bioenergy Agreement mit den Tasks Verbrennung, Vergasung und Vergärung sind in unveränderter Art weiter durchgeführt worden. Ab 2001 übernimmt die Schweiz die Leitung des IEA Task *Biogasnutzung aus Vergärung und Deponiegas* (Task 24).

Wiederum haben etliche Schweizer Forscher im Bereich Biomasse, mitfinanziert durch das BFE, an internationalen Kongressen mit ihren Vorträgen ein beachtliches Echo ausgelöst. Schwerpunkt im Jahre

2000 war sicher die "1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry" in Sevilla, Spanien. Die Schweiz war durch einige Firmen und Fachleute mit interessanten Vorträgen und Postern vertreten:

<http://www.forestresearch.co.nz/ieabioenergy/index.htm>

http://www.ieabioenergy.com/f_tasks.htm

<http://europa.eu.int/en/comm/dg17/prog5/index.htm>

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die Umsetzung von F+E in P+D-Anlagen und Produkte im Bereich Biomasse erfolgte zu einem wesentlichen Teil über das Programm Energie 2000. Generell wurden die Aufwendungen vom BFE im Jahr 2000 für P+D-Anlagen markant erhöht. Erfreulicherweise wurde auch das Angebot für Anlagenbesuche aus dem Beschleunigungsprogramm E2000 (*Energie aus Vergärung*) rege benutzt. Dies zeigt, dass ein grosses Interesse in der Öffentlichkeit vorhanden ist, die Nutzung von Biomasse als erneuerbare Energie auch bei realisierten Anlagen kennenzulernen.

a) *Biomasse verbrennen und vergasen*

Ziel des Projektes **APOLLO 2 Anlage zur Hühnermistverbrennung** [5] ist aufzuzeigen, welche ökologischen Vor- und Nachteile die Verbrennung des Mistes aufweist. Das Projekt läuft parallel zum Projekt Hofdünger [4].

Im Projekt **Keramiklech-Einsatz in der Holzfeuerung** [25] wurde eruiert, ob der Einsatz von Keramikblech in der Kleinholzfeuerung (Naturzug) möglich ist, und welche Verbesserungen bei der Verbrennung zu erwarten sind. Die Reduktion von Emissionen und die Erhöhung des Wirkungsgrads sind aller-

dings zu gering, um den Einsatz von Keramikblech zum heutigen Zeitpunkt zu rechtfertigen.

Bei einem bestehenden Wärmeverbund betrieben von einer Sägerei wurde eine **Machbarkeitsstudie mit Wirtschaftlichkeitsrechnung für eine Wärme-kraftkopplung mit Holz** [26] durchgeführt. Für die benötigte Leistung schnitt der ORC-Prozess (organic ranking system) im Vergleich zur Holzvergasung etwas besser ab.

Ein **Umbausatz für einen Spilling-Dampfmotor auf Trockenschmierung** [29] löste das Problem der Verunreinigung des Dampfes und der dazugehörigen Installationen durch Öl. Erste Erfahrungen sind positiv. Auch die Kosten für den Ersatz der Aktivkohlefilter, Reinigungsarbeiten und die Entsorgung von Ölrückständen fallen weg.

Optimierung eines Gleichstromvergasers im industriellen Massstab für die Vergasung von feuchten Holzschnitzeln und Altholz sowie Entwicklung der trockenen Gasreinigung [27]: Im Zusammenhang mit der Heizungserneuerung im AC-Zentrum Spiez ist es ermöglicht worden, eine Vergaser-Pilotanlage zu installieren. Damit besteht nun die reelle Chance, einen weiteren Meilenstein in der Technologie für Festbett-Vergaser zu erreichen. Eine der schwierigsten Phasen steht nun bevor. Es soll ein Reingas gewonnen werden, welches auf den Motor geleitet werden kann.

b) Biomasse vergären

Co-Vergärung auf Kläranlagen, Machbarkeitsstudien Adelboden und Arbon [30]: Die Kläranlagen Adelboden und Arbon wurden für die Erstellung einer P+D-Co-Vergärungsanlage einer Feinanalyse unterzogen. Die Resultate führen mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Umsetzung des vorgeschlagenen Projektes in der ARA Adelboden.

ARA Samnaun, Co-Vergärung mit Speiseresten [31]: Seit einem Jahr werden im Faulraum der ARA Samnaun mit dem Klärschlamm auch Speisereste aus der regionalen Gastronomie vergärt. Es werden damit Entsorgungskosten eingespart, und als erfreulicher Nebeneffekt reduzierte sich durch die konsequente Trennung und Entsorgung der Speisereste die ARA-Belastung (Biologie) um ca. 25%.

Biogasanlage für die Vergärung von Destillationsrückständen in Kombination mit Abwasserreinigung [32]: Durch Vergärung von Schlempenwasser zusammen mit Produktionsabwasser und anschließender Verwertung des Biogases wird die entsprechende Menge 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 dauert von Oktober 2000 bis März 2001. Betriebsresultate und Schlussbericht werden bis Juli 2001 erwartet.

Realisierung der Kompakt-Biogasanlagen I, II + III [33]: Den Betrieb einer Biogasanlage darf man allgemein als knapp wirtschaftlich bezeichnen. Diese Aussage basiert auf den betrieblichen und wirtschaftlichen Erfahrungen der drei realisierten Anlagen. Insgesamt sind 7 Anlagen in Betrieb oder kurz vor der Fertigstellung.

Biogas-Kompaktanlage – Schautafeln für OLMA und Demonstrationsanlage [34]: Es wurden 4 Schautafeln zur Information der Anlagenbesucher erstellt. Die Tafeln veranschaulichen den Betrieb einer Kompakt-Biogasanlage – von der Gülle bis zur Erzeugung von Strom und Wärme – sowie die regionalen Kreisläufe und die Verbindung zu Ökostrombezüglern.

Bioenergie, Fasern und Protein aus Gras [35]: 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 Möglichkeiten des wirtschaftlichen und energetischen Potenzials des nachwachsenden Rohstoffes Biomasse sensibilisieren. Die Anlage wird voraussichtlich ab Frühjahr 2001 in Betrieb sein.



Anlage zur Kompogas-Aufbereitung

Perkolationsanlage zur Aufbereitung von Grünabfällen [36]: Das Perkolationsverfahren wurde bereits für Restmüll eingesetzt. Für das Aufbereiten von rein organischen Abfällen zeichnet sich eine zukunftsweisende, kostengünstige Lösung ab. Eine Pilotanlage, die ab Frühjahr 2001 bei der FAT in Betrieb gehen wird, soll die nötigen verfahrenstechnischen Parameter erfassen.

c) Biotreibstoff

Green Gas, Biogas als Treibstoff [37]: Das Green Gas Projekt soll die Implementierung von Biogas als Treibstoff gesamtschweizerisch anregen und beschleunigen. Ziel ist es, bis 2005 mindestens 50% des industriell produzierten Biogases (> 6'000 t/Jahr) als Treibstoff zu nutzen. Dank der gesteigerten Attraktivität des Treibstoffs für den Verkehr soll jährlich mindestens eine Anlage neu gebaut werden.

Kaltgepresstes Pflanzenöl als Treibstoff im VW Lupo [38]: Mit einem pragmatischen Ansatz wurde, mittels einer minimalen Anpassung in der Treibstoffzufuhr eines Serienfahrzeuges (VW Lupo Turbo Diesel, 3 Liter/100 km), die Praxistauglichkeit im Normaleinsatz erfolgreich aufgezeigt.

Pilot-Anlage Biogas - HEXIS [39]: Biogas dient als Brennstoff für eine 1 kW SOFC-Brennstoffzelle. Eine Vorserie-Brennstoffzelle soll in diesem Versuch während einem Jahr betrieben werden. Die Erfahrungen sollen generell, aber auch im Vergleich zu anderen Zelltypen, das Machbarkeitspotenzial und die mittelfristig zu erwartende Wirtschaftlichkeit aufzeigen.

Bewertung 2000 und Ausblick 2001

Der Fortschritt der Arbeiten, für welche das BFE im laufenden Jahr rund 3 Mio. Franken zur Verfügung stellte, entspricht etwa den anvisierten Zielen:

Verbrennung/Vergasung Holz: Im Jahr 2000 wurden vor allem Erfolgskontrollen durchgeführt und der Stand der Technik erhoben. Dabei konnte gezeigt werden, dass im Durchschnitt die Emissionen der Anlagen die Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung einhalten. Im Jahr 2001 sollen die Voraussetzungen für eine Zunahme von Holzheizungen durch folgende Verbesserungen geschaffen werden: energetischer Wirkungsgrad, Abgasemissionen, Qualitätssicherung, Wirtschaftlichkeit. Weiter wird die Entwicklung von Holzfeuerungen für Niedrigenergiehäuser und Vergasung verfolgt [28]. In einem neuen Projekt wird mittels Betriebsprüfung untersucht, wie sich Qualität und Wirtschaftlichkeit von Holzfeuerungen weiter verbessern lassen.

Verbrennung von landwirtschaftlichen Abfällen: Eine Prototypanlage zur Verbrennung von Hühnermist konnte realisiert werden, eine Weitere zur Verbrennung von Hofdünger soll 2001 in Betrieb gehen. Nach einer zweijährigen Betriebsphase wird man die ökologischen Vor- und Nachteile anhand von realen Bedingungen diskutieren können.

Vergärung: Der Bau von landwirtschaftlichen Kompakt-Biogasanlagen gestaltet sich weiterhin positiv; die Co-Vergärung hat sich generell bei landwirtschaftlichen Anlagen wie auch bei den ARA's in der Praxis durchgesetzt.

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.).

EnG, EMG, Strommarktöffnung und Ökostrom. Durch die neuen Spielregeln, die sich durch die kürzlich vom Parlament verabschiedeten neuen Gesetze ergeben, haben sich die Rahmenbedingungen für viele private Energieproduzenten im Bereich erneuerbare Energien etwas geklärt. Der Ökostrommarkt scheint sich zu etablieren, und die weitgehend vom BFE finanzierten Studien *Ökobilanzen* der verschiedenen Anlagen bieten für die Zertifizierung sowie für die Ökostromvermarktung eine gute Grundlage.

Generell wurden die Schwerpunkte auf die Resultate der Evaluation *Bereich Biomasse* von 1999 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 2001 die allgemeine Stossrichtung. Es ist zu hoffen, dass vermehrt die Industrie mittels Beteiligung an Forschungsprojekten Engagement zeigt und sich umgekehrt die Forschergruppen Partner in der Privatindustrie suchen.

Liste der Projekte

(JB) Jahresbericht 2000 vorhanden,

(SB) Schlussbericht vorhanden

Die Berichte sind zu beziehen bei: www.energieforschung.ch und www.infoenergie.ch Weitere Adressen: <http://www.energie-schweiz.ch>, www.energy-research.ch, www.biogas.ch, www.vhe.ch

a) *Biomasse verbrennen und vergasen*

[1] Th. Nussbaumer, VERENUM, Zürich: a) *Praxiserhebung über Stickoxid- und Partikelemissionen automatischer Holzfeuerungen* (SB) • b) *IEA, Bioenergy Agreement Task 19 Biomass Combustion* (JB) • c) *Grundlagen der Aerosolbildung* (JB)

[2] C. Bruch u. Th. Nussbaumer, LTNT/ETH-Zürich: *Auslegungsgrundlagen für Holzfeuerungen* (JB) / www.ltnt.ethz.ch

- [3] P. Rüegg, RÜEGG CHEMINEE, Zumikon: *Kleinholzfeuerung mit Feststoffspeicher als Alleinheizung* (SB Sommer 01) / www.ruegg-cheminée.ch
- [4] J.-L. Hersener und R. Bühler, Wiesendangen: *Energetische Nutzung von Biomasse* (JB,SB)
- [5] B. Salerno u. J.-L. Hersener, Langenbruck: Apollo I, *APOLLO 2 Anlage zur Hühnermistverbrennung* (JB)
- [6] R. Bühler, Maschwanden: *Bioenergy Agreement Task 20 Thermal Gasification* (JB)
- [7] P. Hasler, VERENUM, Zürich: *Kontinuierliche Teerbestimmung bei Holzvergaseren mittels FID* (JB)
- [8] Ch. Gaegauf, ÖKOZENTRUM, Langenbruck: *a) Feldmesskampagne Partikelemissionen aus Holzfeuerungen* (JB) ♦ *b) Entwicklung eines Mess- und Prüfverfahrens zur Bestimmung von Wirkungsgrad und Emissionen von Holz-Feuerstätten schwerer Bauart* (SB)
- [9] Ph. Morf u. Th. Nussbaumer, LTNT/ETH-Zürich: *Grundlagen zur Teerbildung bei der Holzvergasung* (JB)
- [10] J. Biollaz, PSI, Villigen: *Redox-Kreisprozess zur Produktion von reinem Wasserstoff aus dem Rohgas eines Holzvergasers* (JB)

b) Biogene Abfälle vergären

- [11] Y. Membrez, EREP, Aclens: *Valorisation bioénergétique de fumiers de volailles* (SB)
- [12] Y. Membrez, EREP, Aclens: *Valorisation énergétique (biogaz) d'huiles comestibles usagées avec différents déchets d'origine agro-alimentaire ("OFEN-HUILES")* (JB)
- [13] H. Engeli, Neerach: *Stand der Technik und Einsatzmöglichkeiten von Membranverfahren bei der Vergärung von Abwässern, Phase I* (SB)
- [14] U. Baserga, FAT, Tänikon: *Co-Vergärung von biogenen Abfallstoffen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen* (SB zu beziehen an der FAT)
- [15] W. Edelmann u. K. Schleiss, U. Baier, H. Engeli, ARBI, Baar: *Ökobilanz von Strom mit landwirtschaftlichen Biogasanlagen* (JB)
- [16] G. Schober, NOVA ENERGIE, Ettenhausen: *Prozessverhalten von in der Schweiz eingesetzten MSW-Gärsystemen unter dem Einfluss steigender Anteile an Küchenabfällen* (SB)
- [17] W. Edelmann, ARBI, Maschwanden: *Übersicht über die Literaturwerte zum Biogasertrag verschiedener Substrate* (SB)
- [18] A. Wellinger, NOVA ENERGIE, Ettenhausen: *Vertretung der Schweiz im IEA Bioenergy Agreement, Task 24, MSW Biological Conversion* (JB)

c) Biotreibstoffe

- [19] M. Meyer, ARGE, Schweiz. Fachhochschule für Landwirtschaft, Zollikofen: *Pflanzenöleinsatz im schnelllaufenden, direkteingespritzten PKW-Dieselmotor* (JB)
- [20] W. Schlachter, FH-Aarau: *Gemischtaufbereitung im Brennraum pflanzenölbetriebener, direkteingespritzter Dieselmotoren System Mahler* (JB)
- [21] A. Fromentin et al., EPF-Lausanne: *Caractérisation de filières de production de bioéthanol dans le contexte helvétique* (SB)
- [22] J.-L. Hersener, ARGE REAL, Wiesendangen: *a) Rationelle Energieanwendung in der Landwirtschaft / vermehrter Einsatz erneuerbarer Energieträger* (JB) ♦ *b) Normierung fester Biomassebrennstoffe* (JB)
- [23] O. Fischli, ENERGIEBERATUNGSSTELLE, Glarnerland: *Messkampagne für eine Solare Klärschlamm-trocknungsanlage Bilten* (JB)
- [24] U. Baier, K. Scheuerer, HSW, Wädenswil : *Biogene Stoffflüsse Schweiz* (JB)+(SB)

Liste der P+D-Projekte

a) Biomasse verbrennen und vergasen

- [25] P. Brogli, Tonwerk, Lausen: *Keramiklech Einsatz in der Holzfeuerung*

- [26] HP. Abbühl, Reinhardt AG, Erlenbach: *Machbarkeitsstudie mit Wirtschaftlichkeitsrechnung für eine Wärmekraftkopplung mit Holz*
- [27] B. Meyer et al, Pyroforce, Emmenbrücke: *Optimierung eines Gleichstromvergasers im industriellen Massstab für die Vergasung von feuchten Holzschnitzeln und Altholz und Entwicklung der trockenen Gasreinigung* (JB)
- [28] M. Bertschinger, Kontaktperson, EMPA Dübendorf: *Diverse Messprojekte Klein-Holzfeuerung im Niedrigenergiehaus*
- [29] H. J. Schmid, Schmid AG, Eschlikon: *Umbau bei einem Spilling-Dampfmotor auf Trockenschmierung*

b) Biomasse vergären

- [30] H. Engeli und E.A. Müller, Neerach: *Standortauswahl und Feinanalysen für je eine P+D Co-Vergärungsanlage in 2 Kläranlagen* (JB) + (SB) ENET
- [31] A. Derungs, CAPREZ ING. AG, Scuol, ARA Samnaun, *Co-Vergärung mit Speiseresten* (JB)+(SB)
- [32] H. Rudolf, COLENCO-HOLINGER AG, Baden: *Biogasanlage für die Vergärung von Destillationsrückständen in Kombination mit Abwasserreinigung* (JB)
- [33] T. Böhni, ENERGIE & UMWELT, Frauenfeld: *Realisierung einer Kompakt-Biogasanlage I, II + III*
- [34] T. Böhni, ENERGIE & UMWELT, Frauenfeld: *Biogas-Kompaktanlage – Schautafeln für OLMA und Demonstrationsanlage* (JB)
- [35] Fritz Widmer, BIOENERGIE SCHAFFHAUSEN AG: *Bioenergie, Fasern und Protein aus Gras* (JB)
- [36] Ch. Widmer, G. Schober, AFAG/FAT Basel/Tänikon: *Perkolationsanlage zur Aufbereitung von Grünabfällen* (JB)

c) Biotreibstoff

- [37] A. Wellinger, BIOMASS SCHWEIZ, Zürich: *Green Gas, Biogas als Treibstoff* (JB)
- [38] T. Böhni, ENERGIE & UMWELT, Frauenfeld: *Kaltgepresstes Pflanzenöl als Treibstoff im VW Lupo* (JB)
- [39] A. Schuler, SULZER HEXIS AG / Y. Membrez EREP SA / J. Vanherle EPF-Lausanne: *Pilot-Anlage Biogas - HEXIS* (kein JB vorhanden, da Projekt Ende Jahr lanciert wurde)

GEOTHERMIE

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 2000

Harald L. Gorhan

harald.gorhan@ewe.ch



Geostrukturen zur Wärme- und Kältengewinnung

Beispiel Energiepfahlanlage Dock Midfield (neuer, 500 m langer Terminal am Flughafen Zürich): Blick in den Armierungskorb eines Energiepfahles (Durchmesser 1 m bis 1,5 m, Länge ca. 30 m), fertig zum Einbau. Erkennbar die Wärmetauscher-Polyethylen-Röhren, in denen später Klarwasser zur Energiegewinnung zirkuliert wird. Aus total 315 Energiepfählen werden jährlich ca. 1'100 MWh an Wärme bzw. 470 MWh an Kälte gewonnen [6].

Programmschwerpunkte

Fortsetzung des Schlüsselprojektes *Deep Heat Mining*, Teilnahme am *Geothermal Implementing Agreement* der International Energy Agency (IEA), Untersuchungen über die gegenseitige Beeinflussung von Erdwärmesonden („Wärmeklau“), über die Le-

bensdauer von tiefen Erdwärmesonden in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung, sowie Neuentwicklungen von Erdwärmesondentypen und Geostrukturen zur Wärme- und Kältenutzung.

Anvisierte Ziele 2000

Hauptziele der eingangs erwähnten Forschungsprojekte waren:

- Standortabklärungen für den Bau eines geothermischen Heizkraftwerkes nach dem Hot-Dry-Rock / Hot-Wet-Rock Verfahren in Basel;
- Abschluss der 1999 begonnenen Sondierbohrarbeiten in Basel/Otterbach, Sicherung der Gesamtfinanzierung;
- Installation einer Beobachtungsstelle im kristallinen Grundgebirge in einer Tiefe von rund 2'300 m bis 2'500 m;
- Datenkompilation für das IEA – Hot Dry Rock, Geothermal Implementing Agreement, Subtask *Data Acquisition and Processing*, bei dem die Schweiz die Federführung innehält;
- Schaffung des Actor-Netzwerkes *Geothermie* zwecks Straffung der indirekten Förderung (Information, Schulung, etc.) dieser erneuerbaren Energieressource (im Rahmen des BFE-Programms EnergieSchweiz);
- Nachführung und Erweiterung der im letzten Jahr durchgeführten Statistik der geothermischen Anlagen in der Schweiz, inklusive Hochrechnung der geothermischen Energieproduktion bis Ende 2000.

- Wärme und- Kältenutzung von Geostrukturen (u.a. Energiepfähle).

Seit mehreren Jahren wird vom Programm *Geothermie* die Verwendung von immer tiefer zu installierenden Erdwärmesonden- (EWS) und EWS-Feldern zur Beheizung von grösseren Gebäudekomplexen propagiert bzw. wurden entsprechende Projekte auf dem Gebiet der angewandten Forschung lanciert. Tatsächlich werden diese Anregungen nun in vermehrtem Masse vom Markt aufgenommen und Sondentiefen von ca. 300 m sind keine Seltenheit mehr. Diese Zunahme von Installationstiefen bedingt allerdings auch eine Intensivierung der Forschung auf folgenden Gebieten:

- Druckfestigkeit (steigender Erddruck) und Lebensdauer von Erdwärmesonden in Tiefen von mehr als 300 m.
- Wirtschaftlichkeit von Isolierungen der obersten Sondenabschnitte und Zuleitungen zur Vermeidung von Temperaturverlusten nahe der Geländeoberfläche.
- gegenseitige Beeinflussung von EWS und Ausarbeitung von Empfehlungen für den Minimalabstand zwischen EWS.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

GENERELL

Revision Geothermische Statistik Schweiz. [1]: Im Bericht *Geothermie: Statistik Schweiz 1990 - 1999* wurde die Wärmeproduktion sämtlicher geothermischer Anlagen für 1999 neu erfasst. Dabei wurde die Geothermie- Statistik nicht nur aufdatiert sondern auch methodisch vertieft. Neu wurden auch die Thermalbäder in die Statistik aufgenommen.

Wie schon in *Geothermie- Inventar und Energiestatistik Schweiz* von 1998 [Schweizerische Vereinigung für Geothermie und Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie der ETHZ, Schlussbericht Dezember 1998] diente die Verkaufsstatistik der Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen (AWP) und der Förder-

gemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS) als verlässliche Arbeitsgrundlage. Die aus der Verkaufsstatistik ermittelten Werte wurden durch separate Erhebungen bei den kantonalen Energiefach- und Bewilligungsstellen überprüft. Weiter wurden auch Bohrfirmen und der Verein Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE) kontaktiert. Die Gesamtbilanz aller Geothermieanlagen wurde neu ermittelt und in die folgenden Gruppen eingeteilt:

1. Erdwärmesonden (EWS)
2. Grundwasserbrunnen
3. Horizontale Erdwärmekollektoren
4. Thermalbäder
5. Wärmetauscher Geostrukturen
6. Tiefe Erdwärmesonden

7. Tiefe Geothermiebohrungen

8. Tunnelwasser

Im Gegensatz zur statistischen Erfassung der Anlagen der Gruppen 1 und 2 konnten die Anlagen der übrigen Gruppen einzeln erfasst werden. Diejenigen Anlagen aus den Kategorien 3 bis 8, welche mittels Wärmepumpen operieren, wurden von den aus der Verkaufstatistik ermittelten Werten abgezogen. Wie erwartet, tragen EWS-Anlagen den grössten Anteil zur gesamten geothermischen Wärmeproduktion bei (siehe Abb. 1). Aus den bereits erwähnten Gründen besteht bei dieser Nutzungstechnologie allerdings noch Bedarf für weitere Forschung. Selbstverständlich sind diese Tätigkeiten mit denjenigen des Forschungsprogramms Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW) und der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS) zu koordinieren.

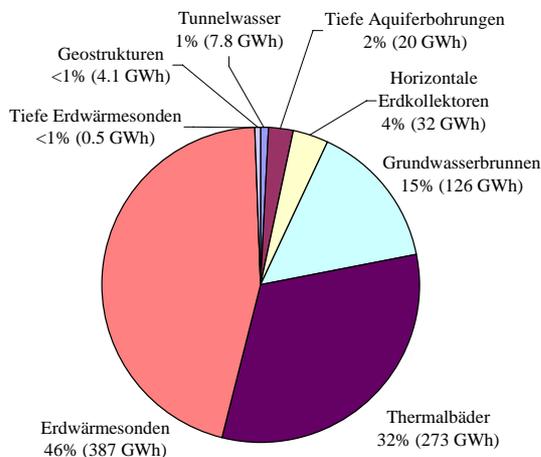


Abbildung 1 Anteile verschiedener Energiequellen an der totalen Wärme-/Kälteproduktion für das Jahr 1999, berechnet anhand der AWP-Statistik

OBERFLÄCHENNAHE GEOTHERMIE

Erneuerbarkeit von Erdwärme – gemeinsame Erklärung [2]: Mit dieser Arbeit konnte erfreulicherweise eine bereits mehrere Jahre währende Meinungsverschiedenheit zwischen der ETHZ und der Ingenieurschule Burgdorf bezüglich der Erneuerbarkeit der Geothermie endgültig beigelegt werden. Diese Arbeit basiert auf den beiden im Jahre 1999 erstellten Untersuchungen und Modellrechnungen „Untiefe Geothermie: woher kommt die Energie“ sowie „Ist untiefe Geothermie erneuerbar“ [siehe letzten Jahresbericht *Forschung 1999*]. Unter der Voraussetzung eines vernünftigen Wärmeentzuges konnte nun gezeigt werden, dass Erdwärme eindeutig den erneuerbaren Energien zuzuordnen ist.

Lebensdauer von Erdwärmesonden in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung [3]: Neue EWS werden in immer grössere Tiefen installiert (d.h. tiefer 300 m). Damit steigt die Erddruckbelastung auf die EWS beträchtlich, was besondere Anforderungen an die Dichtigkeit des Zirkulationssy-

stems stellt. Weiter werden des öfteren EWS überlastet, was zu Gefrier- und Tauzyklen in der Hinterfüllung einer EWS führen kann.

Vier verschiedene Hinterfüllungen wurden am Institut für Geophysik der ETHZ hergestellt und auf folgende Eigenschaften hin untersucht:

- Wärmeleitfähigkeit, vor und nach dem Gefrieren
- Wärmekapazität
- Temperaturstabilität
- Wasserdurchlässigkeit

Parallel zu den Laborversuchen (siehe Abb. 2 und 3) werden in diesem Projekt auch Computersimulationen (FRACture und EED) durchgeführt. Der Schlussbericht soll Ende April 2001 abgegeben werden.

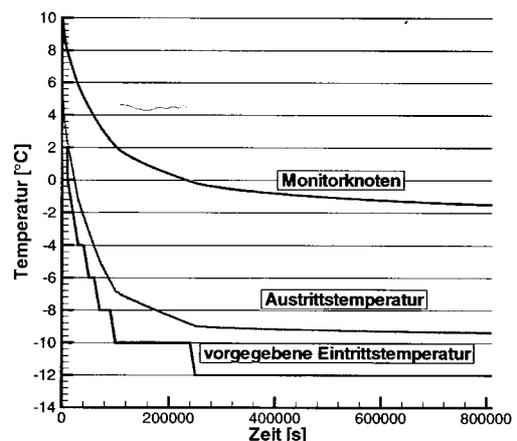


Abbildung 2: Abkühlung EWS während dem ersten Gefrierzyklus: Eintritts-, Austritts- und Monitorknotentemperatur. Aus technischen Gründen (begrenzte Kälteleistung) wurde die erste Abkühlung schrittweise vorgenommen. In 9 ½ Tagen wurde die gewünschte Temperatur von -1.5 °C am Monitorknoten erreicht, wobei innerhalb der ersten drei Tage die Eintrittstemperatur des Fluids von 2 °C auf -12 °C gesenkt wurde. Die spezifische Leistung nahm in derselben Zeit von ca. 130 W/m auf 64 W/m ab.

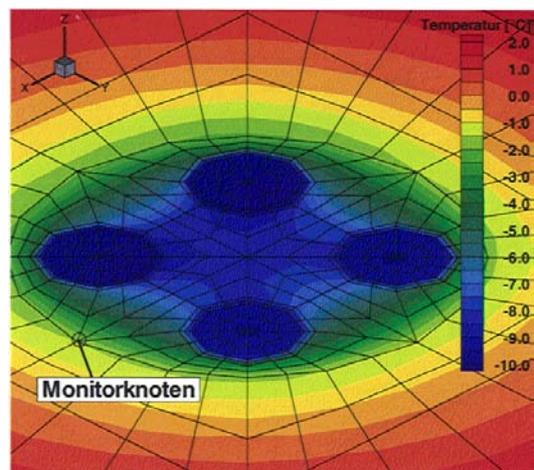


Abbildung 3: Temperaturverteilung Querschnitt bei 31 m Tiefe nach Ende des ersten Gefrierzyklus (nach 9 Tagen): Die Temperatur am Monitorknoten beträgt -1.51 °C. Im Zentrum der Bohrung liegen die Temperaturen unter -8 °C.

Demonstrationsprojekt zum Effizienzvergleich zwischen konventioneller (tiefer) Erdwärmesonde und der neu entwickelten Regenschirm- Erdwärmesonde [4]: Die Regenschirm- Erdwärmesonde besteht aus einem zentralen Rücklaufrohr aus Polyethylen, welches am tiefsten Punkt einen speziellen Fuss aufweist. Von diesem Spezialfuss zweigen acht Vorlaufrohre ab, die endlos bis zum Sammler an der Geländeoberfläche geführt werden. Diese Vorlaufrohre sind radial um das Zentralrohr angeordnet, wobei dazwischen ein kreisringförmiger Sack aus Polyethylen eingelegt ist („Regenschirm“). Bei der Verfüllung des Bohrloches wird eine Betonitmasse in den Sack eingebracht, welche die dünnen Vorlaufrohre an die Bohrloch- Aussenwand anpresst („Aufspannen des Regenschirmes“) und diese so optimal vom zentral verlaufenden Rücklaufrohr trennt. Die thermische Trennung von Vor- und Rücklauf und die Ankopplung der Vorläufe an das wärmependende Erdreich ist so optimiert (siehe Abb. 4). Mittels Vergleichsmessungen mit den, in der selben Anlage installierten konventionellen Erdwärmesonden, soll der technisch- wirtschaftliche Vorteil dieses neuen Sondentyps aufgezeigt werden.

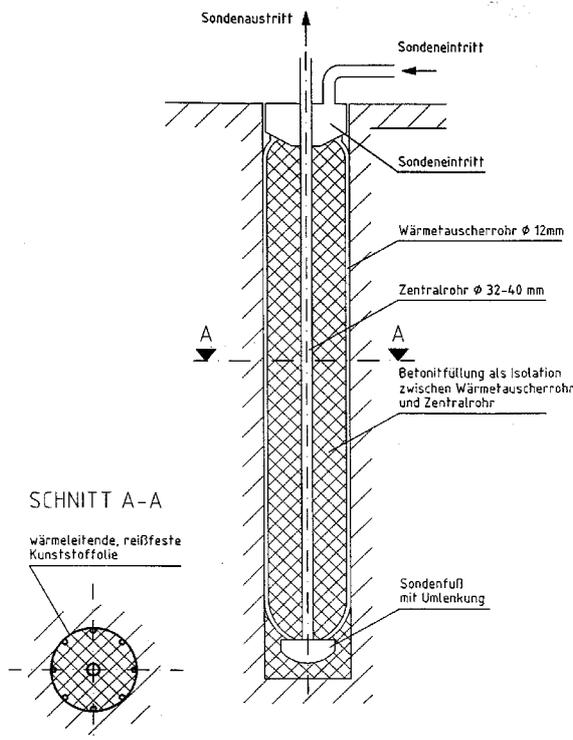


Abbildung 4: Konstruktionsprinzip einer *Regenschirm-Erdwärmesonde*

Wirtschaftlichkeitsprüfung einer Sondenisolation im obersten Abschnitt einer Erdwärmesondenanlage, Otelfingen ZH [5]: Ein Schwachpunkt speziell bei tieferen Erdwärmesonden ohne Isolation sind Wärmeverluste in der oberflächennahen Schicht so-

wie bei den Zuleitungen ins Gebäudeinnere. Normalerweise liegt zwischen Vor- und Rücklauf lediglich das Zementinjektionsrohr und es gibt keine spezielle Isolierung gegen die Bohrlochwand. Eine zweijährige Messkampagne soll nun die technisch- wirtschaftlichen Vorteile von isolierten gegenüber nicht isolierten Erdwärmesonden (in derselben Anlage installiert) aufzeigen.

Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen [6]: Die Energiepfahlanlage für das Dock Midfield der Flughafenerweiterung Zürich- Kloten wurde nun realisiert (siehe Titelbild), basierend auf die Ergebnisse von früheren BFE- Forschungsprojekten:

- *Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs* (1997);
- *Test en conditions réelles d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques* (1998-1999);
- *Response – Test für die Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen* (Projekt des Programms Wärmespeicherung), sowie
- auf das im Zuge dieser Projekte entwickelte Simulationsprogramm „*PILESIM*“.

Als Hauptziel des nun vorliegenden Projektes gilt es, die rein rechnerisch ermittelte Energieproduktion durch effektive Messungen an der fertig erstellten Energiepfahlanlage in der Praxis zu überprüfen.

TIEFE GEOTHERMIE

Projekt Deep Heat Mining (DHM). Anwendung der Hot-Dry-Rock/ Hot-Wet Rock Technologie zur kombinierten Strom- und Wärmeproduktion (WKK) in der Schweiz [7]: In Folge eines gebrochenen Bohrgestänges musste im Oktober 1999 die erste DHM- Testbohrung in Otterbach bei Basel in einer Tiefe von 1535 m eingestellt werden, ohne die geplante Zieltiefe von 2300 m zu erreichen. Trotz dieses Missgeschickes stellten sich die Industriellen Werke Basel (IWB) und der Kanton Basel-Stadt durch die Befürwortung einer Nachfinanzierung der Sondierbohrungen weiterhin hinter die Fortführung des Projektes DHM in Basel, Zoll Otterbach. Dank tatkräftiger Mithilfe des BFE konnte die Gesamtfinanzierung gesichert und die Bohrvorbereitung Ende 2000 wieder aufgenommen werden. Mittels dieser Bohrung und der geplanten Bohrlochtests sollen die folgenden Informationen gewonnen werden:

- Kenntnisse über die Schichtfolge bis ins kristalline Grundgebirge bzw. über das Spannungsfeld im Dach des Kristallins;
- Petrographie des Kristallins und Einfluss auf die Klüftung (Häufigkeit, Orientierung, Gesteins-Charakteristika, etc.);

- Temperaturgradienten in den durchbohrten Formationen und ungestörte Temperatur im Kristallin;
- Wärmeleitfähigkeit kristalliner Lithologien;
- Langzeitmonitoring der seismischen Aktivität mittels Messsonden im Kristallin.

Insbesondere der letzte Punkt ist als wichtiges „Nebenprodukt“ der Explorationsbohrung zu werten. Es wäre in der Schweiz die erste seismische Messstelle im Grundgebirge, die seismische Aktivitäten in grösserer Tiefe und ohne Filterung durch überlagernde Gesteinsformationen erfasst.

Die Arbeiten für den Alternativ-Standort in Genf wurden programmgemäss weitergeführt. Es hat sich gezeigt, dass der Standort Aire in Vernier für die Erstellung einer DHM Pilot-Anlage geeignet wäre. Das Projekt DHM wurde vom Kanton Genf offiziell in den neuen, im Februar 2000 publizierten „Plan directeur cantonal de l'énergie“ aufgenommen. Bei weiterer Mitfinanzierung des Kantons werden 2001 die Geologie und Umweltaspekte dieser beiden Standorte eingehender studiert.

Teilnahme am IEA-Geothermal Implementing Agreement (GIA)(Hot-Dry-Rock) [8]: Dank der Vertretung der Schweiz im GIA Executive Committee (ExCo) und dessen offener Informationspolitik, ist der Zugang zu Resultaten von Annexen bzw. Sub-

tasks gesichert, an welchen sich die Schweiz nicht offiziell beteiligt.

Im Folgenden sind die Ergebnisse des Berichtjahres kurz zusammengefasst:

The general HDR literature list has now reached considerable dimensions. At present approximately 1300 references have been collected and built into this bibliography, which is based upon the "EndNote" system. The latest update of "EndNote" has been acquired to improve compatibility.

Some progress has been made to prepare the way for the extension of the generic project plan into the reservoir development phase. Concerning on-site data acquisition, analysis and instrumentation for initial, post-simulation as well as later development data, important questions have to be addressed soon, such as:

- Where are fractures, which of them are taking or producing how much water and when and furthermore is the hydraulic impedance as expected?
- Are the flow rates and temperatures in the production well developing as planned?
- What is going to be needed for deciding on the strategies to adopt during each of the phases of stimulation, development and later exploitation and management.

Nationale Zusammenarbeit

Auch in der Berichtsperiode fand eine intensive Zusammenarbeit zwischen der Programmleitung Geothermie und Bohrfirmen, Erdwärmesonden-Herstellern, Besitzern von Kur- und Thermalbädern, Bundesstellen (BUWAL und BBW), Hochschulen und Höheren Technischen Lehranstalten statt. Dies sowohl in der deutsch-, (romanisch-) als auch in der französisch-sprachigen Schweiz. Im Tessin erfolgten Kontakte mit Behörden, Fachhochschulen und diversen Ingenieurbüros. Sämtliche durch das BFE geförderten P+D-Anlagen wurden bei der Erstellung und Auswertung begleitender Erfolgskontrollmessungen zusätzlich unterstützt.

Im Rahmen der geplanten Wärmenutzung aus den beiden AlpTransit Tunnels (Gotthard und Lötschberg) fanden erste Kontakte mit Energiefachstellen im Kanton Uri und Bern statt.

Als sehr zeitaufwendig erwies sich die Mitarbeit bei der Erarbeitung der „Strategiepapiere zur Förderung der erneuerbaren Energien 2000-2010“ und bei der Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz (AEE). Des weiteren führte die Erstellung von

Präqualifikationsunterlagen für das Mandat *Geothermie* und die nachfolgende Offertstellung zur optimalen, indirekten Förderung der Geothermie durch das Programm *EnergieSchweiz*, zu intensiven Kontakten mit diversen Berufsverbänden und kantonalen Energiefachstellen.

Die Homepage des Programms: <http://geothermal-energy.ch/> hat mittlerweile einen beachtlichen Bekanntheitsgrad erreicht und führte zu zahlreichen Anfragen sowohl aus dem In- als auch dem Ausland (ca. 7'500 Besucher seit Juni 1999). Von diversen Projektnehmern wurden zudem Presseartikel und geothermische Beiträge für Fachzeitschriften verfasst.

Die Schweizerische Vereinigung für Geothermie (SVG) war und ist in verschiedensten Bereichen sehr aktiv. Als Beispiel sei hier die Durchführung der „SVG- Tagung Wildegge“ anlässlich ihres 10-jährigen Bestehens erwähnt, zu der auch Referenten der anderen erneuerbaren Energien, sowie einige politische Persönlichkeiten eingeladen wurden. Im Jahr 2000 wurden vom SVG drei Bulletin-Nummern veröffentlicht, die auch im Ausland Beachtung fanden.

Internationale Zusammenarbeit

Regel internationaler Informationsaustausch erfolgte im Rahmen der bereits erwähnten Mitarbeit beim *IEA-Geothermal Implementing Agreement* [8]. Auch im Jahre 2000 waren Schweizer Geothermiker an diversen internationalen Tagungen mit Vorträgen präsent von denen unten eine Auswahl aufgelistet ist. Ganz besonders herauszuheben sind hier die überaus regen Vortrags- und Vorlesungstätigkeiten von Herrn Prof. L. Rybach im nahen und auch fernen Ausland:

- Vorträge „*Swiss Geothermal Update 1995-2000*“, „*At what timescale are geothermal resources renewable*“, „*Production capacity and sustainability of geothermal doublets*“, „*Sustainable production from borehole heat exchanger systems*“ and „*Soultz and Weissbad*“, gehalten am „*World Geothermal Congress 2000*“, Japan.
- Jubiläumsveranstaltung des Institutes für Angewandte Geologie an der BOKU in Wien: „*Vorausschauende Geothermik für tiefliegende Tunnelbauten am Beispiel des Gotthard Basistunnels*“.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin: „*The Geothermal Implementing Agreement of the International Energy Agency (OECD)*“.
- Instituto de ciencias de la tierra „*JAUME ALMERA*“ del CSIC, Barcelona: „*Geothermics of the lithosphere*“.
- IEA Workshop „*Renewable Energies*“, Paris: „*Mid- and long term geothermal research and development topics*“.

Im Rahmen des Thermie Forschungsprogramms der EU steht zur Zeit ein deutsch-französisch-schweizerisches Gemeinschaftsprojekt über den aktuellen Kenntnisstand (technisch, wirtschaftlich etc.) der oberflächennahen Geothermie- Nutzung kurz vor dem Abschluss. Projektbeteiligte sind ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), EdF (Electricité de France) sowie Gaudriot-Géotherma auf französischer Seite, die GtV (Geothermische Vereinigung) auf deutscher und Polydynamics Engineering Zürich auf schweizerischer Seite. Dieses Projekt umfasst vier Teilbereiche (Tasks):

Task 1: Vergleich der Technologien von erdgekoppelten Wärmepumpen ("State -of- the- art") zwischen Europa und Nordamerika.

Task 2: Aufzeigen von Erfolgsbeispielen in Europa (F, D, CH sowie in angrenzenden Ländern). Insgesamt sollen 18 Erfolgsbeispiele für erdgekoppelte Wärmepumpen (Ground- sourced Heat Pumps, GSHP; untiefe Geothermie) präsentiert werden.

Task 3: Marktpotential in Europa. Anhand nationaler Untersuchungen soll das Marktpotential für die oberflächennahe Geothermie in Europa abgeschätzt werden.

Task 4: Verfassung einer aktuellen Broschüre in deutscher, französischer und englischer Sprache über erdgekoppelte Wärmepumpen. Die Broschüre wird eine allgemeinverständliche Zusammenfassung des Gesamtprojektes beinhalten.

Die durch ein letztjähriges Forschungsprojekt geknüpften Kontakte mit Russland („*Projets et développements géothermiques- Workshop Suisse- Yaroslavl*“) haben zu einem intensiven Erfahrungs- und Datenaustausch zwischen der NEDRA (Gesellschaft für die wissenschaftlich- industrielle Nutzung des Untergrundes, Russland) und dem Institut für Geophysik an der ETHZ geführt.

Wie bereits erwähnt, wurden in den vergangenen Jahren an der EPFL mehrere Forschungsaufträge auf dem Gebiet „Energiepfähle“ abgewickelt (siehe Kapitel „Oberflächennahe Geothermie“). Das dort vorhandene Know-how ist inzwischen gerade in Frankreich bei mehreren Grossunternehmen (u.a. Electricité de France, EDF) auf beachtliches Interesse gestossen.

Program Joule: „*European Action for Support of Hot Dry Rock Geothermal Energy R + D Activities 1998 – 2000*“: The field activities of the European Hot Dry Rock Project are located at Soultz/F. The overall goal is the extraction of geothermal heat from depths of several kilometres, for CO₂- free electricity generation. The Swiss project contribution, supported by the BBW, forms an integral part of this EU project. The objective of this project comprises data analysis, a better understanding of reservoir behaviour and the creation of a conceptual reservoir model. The results characterize the thermal and hydraulic flow fields at depth (incl. rock- water interaction), the permeability structure at reservoir depth, and the relation between stress field and fracture permeability.

Im Berichtsjahr fanden Besuche von offiziellen Delegationen aus Japan und China statt (Governor Masada, Iwate Prefecture sowie Vertretern der grossen Restaurantkette Aleph Inc. aus Japan bzw. Department of Land and Resources, Liao Ning, Shen Yang, China).

Last but not least darf erwähnt werden, dass mehreren Schweizer Beratungsfirmen geothermische Aufträge in Österreich, Deutschland, Holland, Frankreich Griechenland und auch Japan anvertraut wurden.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Als ausgewählte, typische Beispiele für den gelungenen Transfer der Forschung in die Praxis sind hier einige, zur Zeit laufende P+D-Projekte angeführt:

- Geothermische Wärmepumpe, Schulhaus Egelsee, Kreuzlingen.
- Geothermie Contracting Solar One, Itingen (BL).
- Wärmenutzung aus dem Rickentunnel.
- Tunnelwassernutzung Mappo- Moretina.
- Gewinnung geothermischer Energie aus dem Hauenstein Basistunnel.
- Géothermie Gd- St- Bernard.
- Exploitation du forage géothermique JAFE de Saillon, déferrisation de l'eau et suivi de l'exploitation.
- Exploitation du nouveau forage géothermique P600 de Lavey-les Bains.
- Wärmegewinnung aus Thermalwasser (Schinz-nach Bad).
- WP – Anlage Chestonag Automation AG, Seengen (AG).

- Pieux énergétique avec distribution de chaleur et de froid intégrée dans la structure : Centre Scolaire Ver-l'Eglise / Fully.
- Tiefe Erdwärmesonde Weggis – Messkampagne zur Dokumentation der neuen Einflüsse beim Ausbau der Abnehmerleistung
- Long- term influence of multiple heat extraction boreholes.
- Mesure des performances thermiques d'une pompe à chaleur sur sondes géothermiques avec recharge partielle à Lugano (TI).
- Regionalgefängnis Rheintal, Altstätten (SG): Beheizung und Klimatisierung mittels Energiepfählen, gekoppelt mit Erdwärmesonden.

Alle vom BFE subventionierten P+D- Anlagen werden laufend messtechnisch überwacht um nach mindestens zwei vollen Heizperioden schlüssige Aussagen über Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit machen zu können.

Bewertung 2000 und Ausblick 2001

Die für 2000 gesteckten Ziele bei der oberflächennahen und tiefen Geothermie konnten vollumfänglich erreicht werden. Dies betrifft angewandte Forschungsarbeiten bei EWS-Anlagen, die für immer grössere Tiefen erstellt werden, wobei bei etlichen, bereits erwähnten Aspekten Neuland betreten werden muss. Die erfolgreiche Umsetzung der Forschungsarbeiten kann am folgenden Beispiel illustriert werden:

Im Jahre 1998 wurde die vom BFE geförderte Machbarkeitsstudie „Energetische Nutzung der Thermalwasserbohrung Tiefenbrunnen (ZH)“ abgeschlossen. Der Heizbetrieb des in der Nähe gelegenen Casinos konnte in der Zwischenzeit erfolgreich aufgenommen werden.

Wie bereits erwähnt [6], konnte die erste DHM Pilot- und Horchbohrung in Otterbach bei Basel nicht zu Ende geführt werden. Doch im Verlaufe des Jahres 2000 ist es gelungen, die Rest- bzw. Neufinanzierungen für eine zweite Testbohrung in Otterbach zusammenzubekommen. Dies Dank der engagierten Unterstützung der IWB, des Kantons Basel-Stadt und des BFE. Es ist nun vorgesehen, die Bohrarbeiten noch im Frühjahr 2001 abzuschliessen. Die geplanten Bohrlochtests (vor allem Primär- Spannungsmessungen im kristallinen Grundgebirge) werden dann einige zusätzliche Monate beanspruchen. Basierend auf den gewonnenen Daten gilt es dann, unter Beteiligung der Grossindustrie und von Banken, die Finanzierung von zusätzlichen Tiefbohrungen (d.h. ca. 5'000 m tief) sicherzustellen.

Auf internationaler Ebene wurden bezüglich zukünftiger

IEA- Aktivitäten von Herrn Prof. L. Rybach (Executive Committee Chairman des IEA-Implementing Agreements on Geothermy) erst kürzlich die folgenden Prioritäten zwecks Markteinführung zur Diskussion gestellt:

- *On the need for additional market- assessment of Hot Dry Rock technologies, direct use and combined heat and power production;*
- *Which family of technologies to focus on first (electricity, direct heat, heat pumps);*
- *What the best option would be to encourage market growth, starting with a detailed analysis of market acceleration strategies (on-going work on the "Geothermal power generation cycles" annex to be created, as well as the drilling annex), or organizing a meeting on the largest potential markets*

Besonders erfreulich ist die Entwicklung bei der Wärme und- Kältenutzung von Geostrukturen oder „erdberührten Betonbauteilen“ (neben Gründungs-pfählen können andere Betonbauteile in der Erde als Wärmetauscher benutzt werden, so zu Beispiel Baugrubenumschliessungen aus Schlitz- oder Pfahlwänden). Auf die Nutzungsmöglichkeiten von Energiepfählen wurde anlässlich einer von der Schweizerischen Vereinigung von Geothermie bereits im Mai 1993 an der HSG St. Gallen durchgeführten Tagung speziell hingewiesen. In den folgenden Jahren wurden daraufhin mehrere diesbezügliche Forschungsprojekte sowie die Erstellung plus Qualitätskontrolle von P+D-Anlagen vom BFE gezielt gefördert. Gleichzei-

tig konnte ein Kompetenzzentrum an der EPFL gebildet werden, welches auch in Frankreich auf grosses Interesse stösst. Des weiteren wurden Mitarbeiter der EPFL als Experten zur Erstellung der Energiepfahlanlage für die Flughafenerweiterung Dock Midfield in Kloten beigezogen.



Abbildung 5: Responstest-Anlage der EPFL. Erkennbar Vor- und Rücklauf (Anschluss an die zu testende Geostruktur oder Sonde), Heizanlage und Expansionsgefäss.

Da für die Planung und korrekte Auslegung von grösseren Energiepfahlanlagen die physikalischen Kennwerte des Untergrundes (insbesondere Wärmeleitfähigkeiten) von grosser Wichtigkeit sind, wurde von der EPFL ein Prototyp für eine sogenannte Responstest-Prüfanlage entwickelt, die ebenfalls im nahen Ausland bereits auf beachtliches Interesse gestossen ist (siehe Abb. 5). Für 2001 ist eine Neudimensionierung bzw. Weiterentwicklung dieser dann für den mobilen Einsatz geeigneten Testanlage geplant.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass im kommenden April ein internationales Fachseminar mit dem Thema „*Geostrukturen zur Energiegewinnung*“ von der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie durchgeführt werden wird.

Im Zuge des neuen BFE-Programms *EnergieSchweiz*, sollen mit gezielten Informationstätigkeiten Generalunternehmungen, Planer, Architekturbüros und grössere Baufirmen besser über die verschiedenen geothermischen Nutzungsmöglichkeiten orientiert bzw. die Anwendungsakzeptanz in Gemeinden und Kantonen erhöht werden. Im Jahr 2000 wurden bereits die nötigen Strukturen zu dieser „indirekten Förderung“ (neben Information auch, Marketing, Schulung und Qualitätskontrolle) für das Mandat *Geothermie* erarbeitet, die in diesem Jahr verwirklicht werden sollen.

Liste der Projekte

(JB) Jahresbericht 2000 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

Downloads ab <http://geothermal-energy.ch/>

- [1] INSTITUT FÜR GEOPHYSIK DER ETHZ, Zürich: *Revision „Geothermische Statistik Schweiz“* (SB)
- [2] POLYDYNAMICS ENGINEERING UND HUBER ENERGIETECHNIK, Zürich: *Erneuerbarkeit von Erdwärme – gemeinsame Erklärung* (SB)
- [3] INSTITUT FÜR GEOPHYSIK DER ETHZ UND ENGEO AG, Zürich und Arnegg: *Lebensdauer von Erdwärmesonden in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung* (JB)
- [4] NEK UMWELTTECHNIK AG, Zürich: *Demonstrationsprojekt zum Effizienzvergleich zwischen konventioneller (tiefer) Erdwärmesonde und der neu entwickelten Regenschirm- Erdwärmesonde* (JB)
- [5] ARCHITEKTURBÜRO ROMAN MARTIN AG, Schlieren: *Wirtschaftlichkeitsprüfung einer Sondensolition im obersten Abschnitt einer Erdwärmesondenanlage* (JB)
- [6] UNIQUE ZURICH AIRPORT, Zürich: *Energiepfahlanlage Dock Midfield Zürich Flughafen* (JB)
- [7] ARBEITSGEMEINSCHAFT DEEP HEAT MINING, Zürich: *Deep Heat Mining. Anwendung der Hot Dry- und Wet Rock Technologie zur kombinierten Strom- und Wärmeproduktion (WKK) in der Schweiz* (SB)
- [8] ARBEITSGEMEINSCHAFT POLYDYNAMICS - ETH-Zürich - CHYN, Neuchâtel - HÄRING GEOPROJECT, Zürich: *Teilnahme am Geothermal Implementing Agreement der IEA (Annex III, Hot Dry Rock, Subtask C)* (SB)

WINDENERGIENUTZUNG

Überblicksbericht
zum P+D-Programm 2000

Robert Horbaty

robert.horbaty@enco-gmbh.ch



Teilansicht des zukünftigen Kleinwindparks Crêt Meuron, Kant. NE

Standortabklärungen zeigten, dass auf der Crêt Meuron, in der Nähe der Vue des Alpes, optimale Voraussetzungen gegeben sind, um jährlich rund 13 GWh Elektrizität aus der unerschöpflichen Energiequelle Wind zu generieren. (Fotomontage: EOLE-RES)

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele 2000

Ende 2000 waren weltweit 17'542 MW Windkraftanlagen installiert [25]. Deren Elektrizitätsproduktion entspricht rund der Hälfte des Gesamtstromverbrauchs der Schweiz (~25'000 GWh). Mit Wachstumsraten von über 30% jährlich wird die Energieerzeugung aus Wind zu einem ernst zu nehmenden Faktor im Strommarkt. Sie kann als ein Musterbeispiel von nachhaltiger Entwicklung gelten. Aufgrund der gestiegenen Öl- und Gaspreise war Ende 2000 in den USA Windenergie die billigste Elektrizitätsproduktion [26].

Die Gesamtleistung der Ende 2000 in der Schweiz installierten Windenergieanlagen betrug 2.8 MW. Diese erzeugten rund 3 GWh Elektrizität. Unser Land liegt damit z.B. deutlich hinter dem deutschen Bundesland Baden Württemberg zurück (32 MW), welches bei ähnlicher Grösse vergleichbare Binnenland-Windverhältnisse aufweist.



Windpark auf dem Mont Crosin: Die Erweiterung um zwei Windkraftanlagen mit einer Leistung von je 850 kW ist beschlossen (Foto: Juvent SA)

Der Windenergiemarkt Schweiz entwickelt sich langsamer als bisher angenommen, doch die vorliegenden Projekte machen deutlich, dass an sehr guten Standorten im Jura mit modernen Windenergiekonvertern Auslastungen von bis zu 2000 Volllaststunden möglich sind. Dadurch resultieren Stromgestehungskosten von unter 20 Rp./kWh.

Der vorliegende Jahresbericht beschränkt sich nicht auf die reinen P+D-Aktivitäten [7a], sondern stellt auch die Programmentwicklung im Bereich der Förderung und der marktorientierten Aktivitäten über *Suisse Eole* - der schweizerischen Windenergievereinigung - dar.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

PLANUNGSHILFEN

Mit dem Abschluss der Arbeiten am Leitfaden zur Nutzung der Windenergienutzung in der Schweiz, der

SCHWERPUNKTBILDUNG

Im **Energieforschungskonzept** 2000 –2003 [27] 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 **Umsetzungsstrategien** des Programms sind abgestimmt mit den Unterlagen, welche im Rahmen der Strategie-Entwicklung für das Programm EnergieSchweiz ausgearbeitet wurden [28].

Die **Programmleitung Wind** [7a] hatte sich für das Berichtsjahr folgende konkrete **Ziele** gesetzt.

- 4 baureife Projekte aus den 12 laufenden oder abgeschlossenen Vorprojekten und Beginn von 5 neuen Standortabklärungen.
- Intensivierte begleitende Kommunikationsaktivitäten an zukünftigen Standorten von Windkraftanlagen, klare politische Stellungnahme zugunsten der Windenergienutzung in den Kantonen VD und NE.
- Angebot von „Courant vert“ durch mindestens vier Elektrizitätswerke in der Romandie.
- Optimieren der energiepolitischen Rahmenbedingungen.
- Ausbau von Suisse-Eole als Actor-Netzwerk, zur Übernahme aller windrelevanten Aktivitäten in EnergieSchweiz.

Erklärtes Ziel von EnergieSchweiz ist, bis ins Jahr 2010, zusätzlich 0.8% des heutigen Stromverbrauch (400 GWh) aus neuen erneuerbaren Energien zu produzieren. Aufgrund der vorliegenden Rahmenbedingungen kann für die Windenergie das Ziel gesetzt werden, bis 2010 schon 50 GWh Strom zu erzeugen, was 12.5% der Vorgabe von EnergieSchweiz entspricht.

Präsentation der Potentialkarten bei den Kantonen, dem Aufschalten dieser Karten auf das Internet und den Arbeitsinstrumenten der **V3-Toolbox** [12c], sind nun im umfassenden Sinne Planungsunterlagen zur

Projektentwicklung vorhanden, die auch eine komplexe Topographie berücksichtigen. In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Windenergie-Institut wurde interessierten Planern ein entsprechender **Kurs zur Nutzung der Windenergie** [16b] in der Schweiz angeboten. Ein reibungsloser Planungsprozess vorausgesetzt können bis ins Jahr 2003 rund 20 MW Windanlagen installiert werden.

STANDORTABKLÄRUNGEN

Im Sinne der Schwerpunkte gemäss Energieforschungskonzept [27] unterstützt das P+D-Programm *Wind* Standortabklärungen zur Installation von Windkraftanlagen. Dabei bekommen, nebst der Evaluation der Windressourcen, die raumplanerischen Abklärungen eine immer höhere Bedeutung. Es zeigt sich bei den laufenden Bauprojekten deutlich, dass bei der Grösse der heutigen Anlagen (60m Masten, 60 m Rotordurchmesser) das Planungsverfahren (Richtplanung, Nutzungsplanung) ein bremsender Faktor sein wird. Um die Planungssicherheit weiter zu steigern, soll mit einer **Checkliste Windenergie und Raumplanung** [13] das Planungsverfahren in allen Kantonen mit relevantem Windenergiepotential standardisiert werden. In der Begleitgruppe zu diesem Projekt haben auch das BUWAL und die Stiftung für Landschaftschutz Einsitz, damit der Link zur den Fragen des Landschaftsschutzes gewährleistet ist.

Auf dem Internet [29] sind einerseits Karten von möglichen Standorten mit Windgeschwindigkeiten einsehbar, andererseits werden alle für die Windenergie relevanten Messdaten laufend nachgeführt. Mit den im Zusammenhang mit Standortabklärungen ermittelten Winddaten, entsteht dadurch eine eigentliche **Windenergie-Datenbank Schweiz** [12a], [12b]. Darüber hinaus sind alle realisierten **Windkraftanlagen auf dem Internet** [12e] [16c] beschrieben und mit Wetterprognosen verknüpft - für „windsichere“ Besichtigungen!

Das Bundesamt für Energie (BFE) unterstützte im Jahr 2000 Standortabklärungen an 14 Orten. Nebst den Standorten im Kanton NE (siehe nächstes Kapitel) sind dies: **Mettlimoos-Obwyden** [3], **Flumserberg** [5], **Windpark Sainte-Croix** [14], **Aroser Weisshorn** [17], **Montagne de Moutier** [21], **Grimsepass** [15a], **Gottardpass** [15b] und **Saint-Brais** [24].

Mit diesen Studien wird die Machbarkeit von Windkraftprojekten fundiert abgeklärt:

- Erschliessung (Elektrizität, Zuwege)
- Windressourcen (Windmessungen, Hochrechnungen auf langjährige Verhältnisse)
- Umweltverträglichkeit
- Wirtschaftlichkeit (möglicher Energieertrag und Finanzierung)

Eine weitere Machbarkeitsstudie läuft für **3 Windenergie-Standorte Laax** [23].

BAUPROJEKTE

Im Jahre 2000 wurden mit Ausnahme der Pilotanlage der Firma AVENTA keine neuen Anlagen errichtet. Der Bund unterstützt mit dem Projekt **Standortabklärungen und Messprojekt Leichtwindanlage AVENTA** [4] die Evaluation dieses Prototyps, – inkl. die **fachtechnische Begleitung** [10].

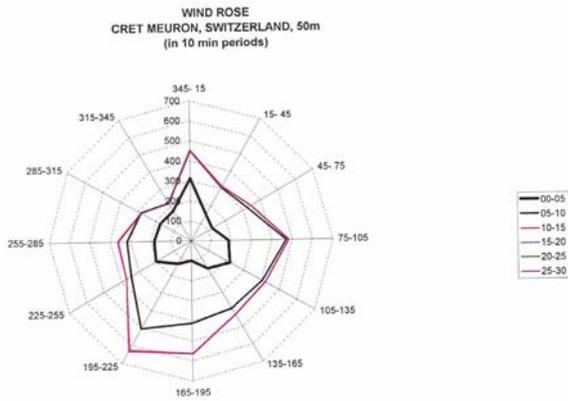


Prototyp der AVENTA Leichtwindanlage in Oberhelfenschwil (Foto: AVENTA)

1. SCHLÜSSELPROJEKT: CRÊT MEURON

Aufgrund eines Auswahlverfahrens - mit Beteiligung aller relevanten Umweltorganisationen - laufen im Kanton NE an verschiedenen Standorten vertiefte Abklärungen zur Installation von Windkraftanlagen. Die Schlussberichte zu **Crêt Meuron** et **Vue des Alpes**, [8] und **Grand-Coeurie** et **Montagne-de-Buttes**, [20] liegen vor, das Projekt **Grand Pradières** [1a] wird nach den Abklärungen der Windressourcen nicht weiter verfolgt (grosse Opposition) und bei **La Racine** [1b] wurden erste Windmessungen durchgeführt.

Die detaillierte Machbarkeitsstudie am Standort **Crêt Meuron** [8] zu allen relevanten Aspekten (Wind, Umwelt, elektrische Erschliessung, Zufahrt, raumplanerische Auflagen, etc.) zeigt, dass eines Kleinwindparks mit mind. 6 Stück 1.65MW-Anlagen vorliegen. Das langjährige Mittel der Windgeschwindigkeit ist auf 50 m Höhe 6.16 m/s, womit rund **13 GWh Elektrizität** erzeugt werden könnte, was 1.3 % des Stromverbrauchs des Kantons NE entspricht. Mit einem vertiefenden Vorprojekt werden nun die Voraussetzungen geschaffen, um bereits im Jahre 2002 diesen Windpark errichten zu können.



Windrose der Windgeschwindigkeiten auf der Crêt Meuron im Kanton NE (Grafik: Eole-RES)

2. SCHLÜSSELPROJEKT: 850 KW-WINDKRAFTANLAGE AUF DEM GÜTSCH [6]

In den Jahren 1996 - 1998 wurden bei Standorten der Armee Evaluationen durchgeführt, um deren Tauglichkeit für Windenergieprojekte abzuklären. Als geeigneter Standort resultierte der Gütsch, ein auf 2400 m gelegener Höhenzug oberhalb Andermatt UR. Mit dem vorliegenden Projekt wird nun eine 850-kW-Anlage installiert und betrieben. Ziele des auch vom Kanton UR unterstützten P+D-Projektes sind:

- Demonstration der Möglichkeiten der Windenergienutzung an einem Gebirgsstandort, (erste Anlage der 600-900-kW-Klasse weltweit in einer Höhe von über 2'000 m). Betrieb einer grossen Windkraftanlage unter alpinen Bedingungen (Auswirkungen von Kälte, Vereisung und turbulenten Winden auf Ertrag).
- Anlagentransport unter anspruchsvollen Bedingungen, (weitere Verifizierung des Windenergiepotentials in der Schweiz).
- Betriebsoptimierungsphase und Erfolgskontrolle (u.a. für Beobachtungen der Wettereinflüsse, Verifikation des V3-Tools).

- Spezielle Einrichtungen wie Online-Infowand im Dorf, Webkamera, etc. sind für Öffentlichkeitsarbeit vorgesehen (Erlebniseffekt).

In 200 m Distanz zum zukünftigen Anlagenstandort liegt ein Messstandort von Meteo-Schweiz, wodurch langjährige Daten zum Windregime vorhanden sind. Das langjährige Mittel der Windgeschwindigkeit beträgt dort 5.64 m/s. Hochgerechnet auf Nabenhöhe der Anlage kann mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von ca. 7 m/s gerechnet werden - für schweizerische Verhältnisse ein ausgezeichnete Standort. Mit den Projektierungsarbeiten wurde im Dezember 2000 begonnen, die Anlage soll im August 2001 ans Netz gehen.

3. SCHLÜSSELPROJEKT: FACTS [12d, 30]

Das V3-Toolbox Software-Programm wird im Zusammenhang mit dem Pilotprojekt Gütsch validiert.

- Die Windressourcen der letzten 10 Jahre werden in einer grossräumigen Umgebung um den Gütsch mit einem Wettermodell ermittelt. Die Winde werden auf einem Raster von ca. 7 km aufbereitet, woraus eine Karte mit den langjährig zu erwartenden Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe erstellt wird.
- Aus den klimatologischen Verhältnissen werden für die typischsten lokalen Winde um die Windkraftanlage mit einem noch anzupassendem, kommerziellem CFD-Programm (Computational Fluid Dynamics) berechnet.
- Für den Standort Gütsch wird das entwickelte Verfahren angewandt und die langjährig zu erwartende Energieproduktion am geplanten Standort für einen vorgegebenen Typ einer Windturbinen berechnet.

Die Entwicklung der Methode und die Analysen erfolgten in enger Kooperation mit dem nationalen Rechenzentrum CSCS / ETH Zürich. Eine ausführliche Dokumentation wird im Rahmen des Projekts "Werkzeug zur Vorhersage der Windenergieproduktion im Gebirge **V3-Toolbox**" [12c] erstellt.

Nationale Zusammenarbeit

Die Windenergievereinigung *Suisse Eole* konzentriert alle relevanten Anliegen der Windenergienutzung in der Schweiz – in Zusammenarbeit mit den kantonalen Energiefachstellen und den Planern. Nebst Informations- und Kommunikationsaktivitäten im Rahmen der konkreten Projekte organisierte *Suisse Eole* auch eine national beachtete Medienkonferenz.

Mit dem Betreiber des grössten Windparks in der Schweiz, der Juvent SA, besteht ein reger Erfahrungsaustausch, um die konkreten Betriebserfahrungen dieser 4 Anlagen in die zukünftigen Strategien des Windenergieprogramms integrieren zu können.

Zum Thema Windenergie und Landschaftschutz wird eine enge Zusammenarbeit mit den Umweltorganisationen und dem BUWAL gepflegt.

Der "Verein für umweltgerechte Elektrizität VUE" zertifiziert heute Anlagen und Stromprodukte mit dem Ökostromlabel *naturemade* [31]. Dies 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.

Suisse Eole ist auch im Vorstand der "Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz AEE" ver-

treten und nimmt dort die Angelegenheiten v.a. der nicht gebäudegebundenen erneuerbaren Energien, wie Wind, Kleinwasserkraftwerke, etc. wahr.

Internationale Zusammenarbeit

EOLE-RES, ein international tätiger Entwickler von Windparks mit Sitz in London, hat mit den detailliert durchgeführten Standortabklärungen im Neuenburgerjura **Crêt Meuron** et **Vue des Alpes**, [8], **Grand-Coeurie** et **Montagne-de-Buttes**, [20] wichtige Informationen und Grundlagen zur Entwicklung von Windenergieprojekten in der Schweiz erarbeitet. Zum Projekt **Sichtbarkeit von Windenergieprojekten im Jurabogen** [18c] wurden weitere wichtige Inputs geliefert.

Als Weiterführung des EU-Forschungsprojektes *WECO* (Wind Energy in Cold Climate) wurde, mit Partizipation des schweizerischen Windenergieprogramms, das Nachfolgeprojekt *ICETOOL* entwickelt. Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung von Instrumenten und Anlagekonzepten zur Reduktion der negativen Einflüsse der Vereisung von Windkraftanlagen. Aufgrund der heute noch fehlenden Installationen im Gebirge, hat sich die Schweiz kurzfristig

aus diesem Programm ausgeklinkt.

Mit dem Deutschen Windenergie Institut DEWI [32] bestehen enge Beziehungen. So wurden wesentliche Inputs der **Aus- und Weiterbildungskurse im Bereich Windenergie** [16b] von diesem Institut eingebracht.

Es bestehen gegenseitige Mitgliedschaften von *Suisse Eole* mit der Deutschen Windenergievereinigung und der Fördergesellschaft für erneuerbare Energien in Freiburg, D.

Die Ergebnisse des Projektes **FACTS** [12d] werden im Rahmen eines Modellierungsworkshops – mit internationaler Beteiligung – Planern, Fachleuten und Investoren vorgestellt. Dies garantiert eine gute Einbindung in den aktuellen Stand des Wissens und eine optimale praktische Umsetzung.

Marktorientierte Umsetzung: Suisse Eole

Nebst den P+D-Projekten sind die Förderprojekte und v.a. die Marktbearbeitung über *Suisse Eole* ein wesentlicher Bestandteil des Programms *Wind*. Die Unterstützung der flankierenden Massnahmen zur Entwicklung der Windenergie in der Schweiz über *Suisse Eole*, ermöglicht die zügige Umsetzung aller Machbarkeitsstudien und Standortabklärungen. Nachfolgend sind die Schwerpunkte der Arbeiten von *Suisse Eole* aufgelistet:

- Zur attraktiven und breiten Vermarktung von Windstrom wurde einerseits eine **Marktuntersuchung Vermarktung Windstrom** [11] in den Kantonen NE und VD durchgeführt und andererseits eine **Kampagne zur Vermarktung von „Courant vert“ in der Suisse Romande** [19] lanciert. Eine weitere Aktivität in diesem Kontext ist die **Erarbeitung eines Marketingkonzeptes Windenergie** [2].
- Im Sinne einer Optimierung der Projektqualität und der Planungssicherheit wurden **Aus- und Weiterbildungskurse im Bereich Windenergie** [16b] für Planer und Betreiber durchgeführt.

- Mit der **Erweiterung Homepage Suisse Eole** [22] [16c] sind nun die vielfältigsten Informationen und Planungshilfen On-Line abrufbar [33].
- Durch die Weiterführung von je einer **Infostelle in der Deutschschweiz** [16a] **und in der Romandie** [18a] werden eigentliche Kompetenzzentren zur Nutzung der Windenergie - als Ansprechpartner für Planer, Behörden, Windstromproduzenten und -kunden sowie die breite Öffentlichkeit - weiter ausgebaut.
- Über **Kommunikationsmassnahmen**, aktive **Medienarbeit**, den **Newsletter** [9] und über das **Internet** [22] wird die Bekanntheit und das positive Image der Windenergie in der Schweiz gestärkt.
- Zusammen mit den zuständigen Kantonen werden Kampagnen (**Communication Arc jurassien**) [18b] an möglichen, zukünftigen Standorten von Windkraftanlagen durchgeführt.

Bewertung 2000

POSITIVE ENTWICKLUNGEN

- Heute sind umfassende **Planungsunterlagen** zur Projektentwicklung vorhanden.
- Die Nachfrage nach **Ökostrom**, v.a. im Kontext mit dem Fördermodell des Labels *naturemade*, übersteigt heute das Angebot deutlich. Als konkretes Resultat der Aktivitäten von *Suisse Eole* sind in diesem Zusammenhang entsprechende Projekte auch in der Romandie in Entwicklung, erste Produkte sollen im Frühjahr 2001 auf den Markt kommen.
- *Juvent SA* [34], die Windenergietochter der BKW, hat vor dem Hintergrund der stark wachsenden Nachfrage für Ökostrom beschlossen, zwei weitere Windturbinen mit einer Leistung von je 850 kW auf dem Mt. Crosin einzurichten. Die Stromproduktion an diesem Standort wird dadurch um ca. 70% auf rund 4 Mio kWh erhöht. Der dazu notwendige regionale Richtplan wurde **ohne Einsprachen genehmigt**.
- Das Elektrizitätswerk Ursern hat beschlossen, eine **850-kW Windkraftanlage** auf dem Gütsch bei Andermatt zu errichten.
- Die neusten Windmessungen an zukünftigen Standorten in der Schweiz zeigen klar, dass auf Nabenhöhe der heutigen Anlagen (60-80 m) **deutlich höhere Windgeschwindigkeiten** vorliegen, als ursprünglich angenommen (grösser als 6 m/s).
- Das zunehmende **Interesse der einheimischen Industrie** macht deutlich, dass auch schweizerisches Know How in der rasanten Entwicklung der Windenergiebranche eine Rolle spielt, wie z.B. die Leistungselektronik für die 2.5 MW-Anlage der Firma IDS AG in Zürich. Die Firma Bartholdi in Koblenz (AG) hat vom holländischen Windturbinenhersteller LAGERWEY den Auftrag erhalten, 100 Generatoren neuester Technologie mit einer Leistung von je 750 kW im Wert von 18 Mio Franken zu liefern. .
- Auch die **ABB Industrie AG** wird ernsthaft ins Windenergiegeschäft einsteigen. Die Vision steht

im Raum, eine schweizerische Windkraftanlage (*Swiss Alpine Windturbine*) zu entwickeln - mit kompetenten Partnern aus der schweizerischen Industrie. ABB ist überzeugt, mit einem neuen Produkt im boomenden Windenergiemarkt (30% jährliches Wachstum) ein wichtiger Mitspieler werden zu können.

- **Engagement** aller grossen Natur- und Landschaftschutz-Organisationen zugunsten eines sorgfältig geplanten und mit den Landschaftschutzaspekten abgestimmten Ausbaus der Windenergie.
- An der Pressekonferenz vom 25.5.2000 haben die Regierungen des Kt. VD und NE klar dem **politischen Willen** Ausdruck gegeben, Windenergieprojekte in ihren Kantonen zu unterstützen.

BREMSENDE ENTWICKLUNGEN

Anders als im benachbarten Ausland [35] wurden in der Schweiz im letzten Jahr keine neue Windkraftanlage in der Leistungsklasse grösser als 100 kW installiert. Gründe sind:

- **Unsicherheit** bezüglich energiepolitischer Marschrichtung (Volksabstimmung zu energiepolitischen Vorlagen am 24.9.2000).
- Aufgrund der **Marktöffnung** legen die meisten Elektrizitätswerke für neue Projekte eine grosse Zurückhaltung an den Tag.
- Die diversen **Interventionsmöglichkeiten** im Rahmen von Planungsprozessen für Projekte sind mitverantwortlich für die schleppernde Entwicklung von Windenergieprojekten
- Bis zur definitiven Inkraftsetzung des **Elektrizitätsmarktgesetzes** EMG (Referendum) sind die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für Investoren (Rücklieferarife, Durchleitungskosten, Marktöffnung, etc.) noch sehr unsicher. Dies führt weiterhin dazu, dass entsprechende Projekte von unabhängigen Stromproduzenten sehr zurückhaltend angegangen wurden.

Ausblick 2001

Der Windenergiemarkt wächst weltweit mit einer grossen Dynamik. Beobachter rechnen bis 2008 mit einer Verachtfachung der installierten Kapazität [36] ($\approx 120'000$ MW installierte Leistung). Die Branche wächst momentan 30% jährlich, ein Resultat das nur noch von der Mobilkommunikation übertroffen wird. Windenergiefirmen wie *Vestas Dänemark* sind die Highflyer an den Börsen.

Die Entwicklung geht - sinnbildlich gesprochen - in

zwei Richtungen weg von den Küsten. Einerseits beginnt die Entwicklung von grossen Off-Shore Windparks im Meer, andererseits werden zunehmend Binnenland-Standorte bis hin zum Gebirge mit Windenergieanlagen erschlossen.

Unterstützt wird diese Tendenz durch die stürmische technische Entwicklung der Anlagen selbst. Bereits heute gehen Serienanlagen mit einer Leistung von 2.5 MW (!) ans Netz, Anlagen mit 80 m Rotordurchmes-

ser und bis zu 100m hohen Türmen. Anlagen für den Off-Shore-Einsatz mit einer Leistung von 5 MW sind in Planung. Eine hohe Verfügbarkeit der Anlagen, auch in orkanartigen Stürmen (Lothar), ist heute eine Selbstverständlichkeit.

Für die weitere Entwicklung der Windenergiebranche in der Schweiz sind folgende Punkte wesentlich:

- Die Installation von weiteren Windkraftanlagen wird die Bestätigung der Umsetzungsstrategien bringen. Konkrete Bauprojekte liegen heute vor für:
 - Juvent SA: Ausbau Mont Crosin mit zusätzlich 1.7 MW
 - EW Ursern: 850- kW-Anlage auf dem Gütsch
 - R. Aregger: 750-kW-Anlage bei Rengg im Entlebuch, (Teil des Projektes Biosphärenreservat).
- Aufgrund der grossen Nabenhöhen (bis zu 100 m) müssen die bisherigen Aussagen zu den nutzbaren Windverhältnissen in der Schweiz (auf der Basis von Messungen von Meteo Schweiz auf 10-20 m Höhe) nach oben revidiert werden. Dies wird durch die laufenden Messungen (z.T. auf 50 m) im Jura bestätigt. Der Einsatz der Windenergie ist in Zukunft wohl auch an weniger exponierten Standorten (Landschaftschutz) möglich. Weitere Standortabklärungen müssen dies bestätigen.
- Die Erfahrungen in der Planung von Windparks in Sainte-Croix und im Kanton NE zeigen zunehmend die Wichtigkeit der raumplanerischen Voraussetzungen für Windenergie-Standorte. In Zusammenarbeit mit den kantonalen Instanzen, den Landschaftschutz-Organisationen und mit der Bevölkerung sollen im Rahmen von Richt- und Nutzungsplanungsverfahren mögliche Gebiete ausdifferenziert werden.
- Die Ertragsberechnungen für zukünftige Wind-

energie-Standorte im Gebirge sind nach wie vor mit grossen Unsicherheiten verbunden. Mit den vorliegenden P+D-Projekten wird hier Neuland beschritten. Die durch schweizerische Planungsfirmen gemachten Erfahrungen im Site-Assessment, dem Know How komplexer Installationen und in der Modellierung der Windverhältnisse im komplexen Terrain können weltweit (Alpen, Anden, etc.) angewendet und angeboten werden.

- Das schweizerische Know How in der Installation von technischer Infrastruktur unter klimatisch und logistisch sehr schwierigen Bedingungen (Kraftwerke, Stromleitungen, Bergbahnen) wird bei der Installation von Anlagen im Gebirge sehr hilfreich sein und ist ebenfalls ein Marktvorteil in der Planung und bei der Installationen von Windparks auch ausserhalb der Schweiz.
- 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 öffnet Marktchancen für die teure aber qualitativ hoch stehende schweizerische Elektro- und Messapparatebranche.

Die Windenergienutzung hat ein riesiges Potential mit einer Bedeutung für die Wirtschaft, welche weit über den Nischenmarkt Schweiz hinaus reicht. Sie entwickelt sich heute in einem Bereich, welcher als Kerngeschäft der schweizerischen Elektro- und Maschinenindustrie bezeichnet werden muss. In Zukunft gilt es:

- die gemachten Erfahrungen auszuwerten,
- diese einem interessierten Publikum zugänglich zu machen,
- die Hochschulen noch vermehrt einzubeziehen und
- die Industrie und das Gewerbe zu motivieren verstärkt einzusteigen.

Projektliste

(JB) Jahresbericht 2000 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

- [1] ADEV, *Liestal: a) Grand Pradières* (JB) ♦ *b) La Racine* (JB) / info@adevsolarstrom.ch
- [2] AHA, MARKETING, *Basel: Erarbeitung eines Marketingkonzeptes Windenergie* (JB) / aha@magnet.ch
- [3] AREGGER ROLAND, *Rengg: Windverhältnisse Region Mettlimoos-Obwyden* / aregger_feldmoos@freesurf.ch
- [4] ARGE AVENTA, *Schlieren: Standortabklärungen und Messprojekt Leichtwindanlage AVENTA* (JB)
- [5] C+N Ingenieure AG, *St. Gallen: Windpark Flumserberg* (SB) / c-n.ingenieure@gmx.ch
- [6] ELEKTRIZITÄTSWERK URSERN, *Andermatt: WKA Gütsch* / : ew-ursern@bluewin.ch
- [7] ENCO GMBH, *Langenbruck: a) Programmleitung Wind* (JB) ♦ *b) Leitung Projekte Suisse Eole* / <http://www.enco-gmbh.ch>, e-mail: robert.horbaty@enco-gmbh.ch

- [8] EOLE - RES SA, Grossbritannien: *Crêt Meuron / Vue des Alpes* (SB) /: <http://www.res-ltd.com/>, e-mail: william.hopkins@res-ltd.com
- [9] IDEJA , Basel: *Suisse Eole: Medien/Kommunikation* / idea@datacomm.ch
- [10] INTERWIND, Zürich: *Begleitung Leichtwindanlage AVENTA* (JB), / <http://www.interwind.ch/>, e-mail: INTERWIND@compuserve.com
- [11] MEDICTIF SA, Vevey: *Marktuntersuchung Vermarktung Windstrom* (SB) / : mediactif@swissonline.ch
- [12] METEOTEST, Bern: a) *Datenbank Wind* (SB) ♦ b) *Datenbank Wind Franz. und Engl.* (JB) ♦ c) *V3 – Toolbox* (JB) ♦ d) *FACTS: Windberechnungen am Beispiel des Gütsch* ♦ e) *Windkraftanlagen auf dem Internet* / <http://www.meteotest.ch> e-mail: kunz@meteotest.ch
- [13] METRON RAUMPLANUNG AG, Brugg: / <http://www.metron.ch> e-mail: info@metron.ch
- [14] MUNICIPALITÉ DE LA COMMUNE DE Sainte-Croix: *Windpark St.Croix* (SB) / Planer: <http://www.interwind.ch/>, e-mail: INTERWIND@compuserve.com
- [15] NEK UMWELTTECHNIK AG, Zürich: a) *Potential- und Standortabklärungen für ein Windenergieprojekt auf dem Grimselpass* ♦ b) *Windenergieprojekt auf dem Gotthardpass, Airolo, TI* <http://www.nek.ch> e-mail: info@nek.ch
- [16] NOVA ENERGIE, Aarau: a) *Infostelle Wind DCH* (JB) ♦ b) *Aus- und Weiterbildungskurse im Bereich Windenergie* (JB) ♦ c) *Windkraftanlagen auf dem Internet* (SB) / <http://www.novaenergie.ch/>, e-mail: herbert.moesch@infoenergie.ch
- [17] OEKOPLAN, Zürich: *Standortabklärungen Arosler Weisshorn* (JB) / mzabelka@access.ch
- [18] PLANAIR, La Sagne: ♦ a) *Eole-Info* (JB) ♦ b) *Communication Arc jurassien* (JB) c) *Sichtbarkeit von Windenergieprojekten im Jurabogen* (SB) / info@planair.ch
- [19] PROM-ENER, Vevey: *Kampagne zur Vermarktung von „Courant vert“ in der Suisse Romande* (JB)
- [20] EOLE - RES SA, Grossbritannien: *Projets Eoliennes Grand-Coeurie et Montagne-de-Buttes*, (SB) / <http://www.res-ltd.com/>, e-mail: william.hopkins@res-ltd.com
- [21] SERVICE TECHNIQUES, Moutier: *Montagne de Moutier* (SB)
- [22] STALDER; M., Hauptikon: *Erweiterung Homepage Suisse Eole* (JB) / m.stalder@energienetz.ch
- [23] WEISSKOPF PARTNERS, Zürich: *Machbarkeitsstudie 3 Windenergie-Standorte Laax* weisskopf.thomas@bluewin.ch
- [24] WINDWATT SA, Carouge: *Mesures et études d'impacts pour éoliennes à Saint-Brais, JU* schneider-m@bluewin.ch

Referenzen

- [25] „Another year of records“, New Energy 1/2001
- [26] Windpower Monthly, Vol. 16, September 2000, Seite 27
- [27] Konzept der Energieforschung des Bundes 2000 - 2003, Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, Nov. 1999
- [28] „Strategie Erneuerbare Energien 2000 – 2010“ H.U. Schärer, Sektionschef Erneuerbare Energien des BFE
- [29] <http://www.suisse-eole.ch/d/Info/Default.htm>
- [30] FACTS: Framework for Application of Computational Fluid Dynamics Models in Complex Terrain
- [31] <http://www.naturemade.org/d/>
- [32] <http://www.dewi.de/>
- [33] <http://www.suisse-eole.ch/d/Service/Default.htm>
- [34] <http://www.juvent.ch/>
- [35] Nach einer Herstellerumfrage des Bundesverbandes Windenergie (BWE) e.V. in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Windenergie Institut (DEWI) GmbH gingen im ersten Halbjahr 2000 in Deutschland insgesamt 493 Windturbinen mit einer Gesamtleistung von 528,24 Megawatt (MW) neu ans Stromnetz.
- [36] World Market Update, BTM Consult Aps, März 1999

Einleitung

UNSICHERE WIRTSCHAFTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Mit dem Jahrtausendwechsel bahnt sich die grösste Umwälzung in der Elektrizitätswirtschaft seit ihrem Bestand an. Erst gegen Ende 2000 wurden die zukünftigen Rahmenbedingungen klarer – um wieder mittels Referendum in Frage gestellt zu werden.

Für Kleinstkraftwerke wurden sehr gute **Ertragsbedingungen** erzielt, für grössere Kleinwasserkraftwerke akzeptable Bedingungen. Die wesentlichen Initiativen für diese Verbesserungen kamen von Seite der Kleinwasserkraftwerke-Betreiber, die sich vor allem vor den publizierten Durchleitkosten bedroht fühlten. Dies spiegelt die Bedürfnisse der Branche: Den Kleinwasserkraftwerken genügt eine Förderung resp. ein Kostenvorteil von wenigen Rappen bis 10 Rappen pro Kilowattstunde zum Erreichen der Konkurrenzfähigkeit gegenüber anonymem ("beliebig-") Strom. Dies konnte glaubwürdig durchgesetzt werden.

Wegen dem bevorstehenden Termin für die Sanierung der Gewässer gemäss revidiertem **Gewässerschutzgesetz** gerieten viele Kleinwasserkraftwerke im Berichtsjahr unter starken Druck: Währenddem grössere Kraftwerke wegen den neuen Restwasservorschriften, dem Bau von Fischtreppe, dem Umbau von Geschwemmselektrosorgung usw. einige Prozente Verschlechterung ihres Kosten-Ertrags-Verhältnisses hinnehmen müssen, beläuft sich diese Beeinträchtigung bei Kleinwasserkraftwerken in vielen Fällen auf ein Mehrfaches, bis hin zur physischen Verunmöglichung des Betriebes. Etliche Kantone bereinigen im gleichen Zuge wasserrechtliche Unstimmigkeiten und tendieren zur Löschung ehehafter Rechte. Mitunter sind Anlagen in Frage gestellt, welche seit Generationen oder sogar seit dem Mittelalter bestehen. Betroffen sind insbesondere Pico-Kraftwerke und Reaktivierungen.

Ernüchterung ergab sich auch aus Folgendem:

- Es gibt keine zahlenmässigen Erhebungen über die seit 1985 stillgelegten Anlagen und gelöschten Wasserrechte und somit keine verlässlichen Statistiken über Kleinwasserkraftwerke (Anlagen bis 300 Kilowatt).
- Nur wenige Elektrizitätsverteilunternehmen (EVU) zeigten Interesse, analog zu ihren boomenden Solarstrom- und Ökostrombörsen, auch Strom von unabhängigen, privaten Kleinwasserkraftwerken zu vermarkten. Strom aus EVU-eigenen Kleinwasserkraftwerken wurden von einzelnen EVU zwar als Ökostrom vermarktet, der Erfolg war jedoch nicht durchschlagend, vermutlich weil zum Teil die Aufpreise zu hoch lagen.

BLOCKIERTE BRANCHE

Die Investitionsbereitschaft der Elektrizitätswirtschaft für Wasserkraftwerke ist angesichts der Unsicherheiten mit der Marktöffnung und der Situation im europäischen Elektrizitätsmarkt auf einem absoluten Tiefpunkt. Die Banken stellen für unabhängige private Produzenten (UPP) höhere Hürden für die Finanzierung. Die Unsicherheiten der Marktöffnung schrecken Investoren von grösseren Werken ab. Die Kraftwerke im öffentlichen Besitz werden nur noch saniert und erweitert, wenn sehr niedrige Energiegestehungskosten resultieren. Manch attraktives Erweiterungsprojekt wird auf Jahrzehnte durch eine Minimalanierung "verbaut" - Erweiterungs- und Optimierungspotential liegen brach.

Der kleine Boom bei kostengünstigen Nebennutzungen wie zum Beispiel Trinkwasserkraftwerke hingegen hält an.

Anvisierte Ziele 2000

STRATEGIE

Angesichts der fortschreitenden Verunsicherung der Investoren und Bauherren im Berichtsjahr lag der Schwerpunkt des Programmes wie bereits 1999 eindeutig in der Information und Beratung und in der Öffentlichkeitsarbeit. Nebenziel war eine positive Beeinflussung der Volksabstimmung über die Energievorlagen und der parlamentarischen Beratung des Elektrizitätsmarktgesetzes.

Die **Information und Beratung** geriet zum politischen Thermometer der Branche. Wegen der widersprüchlichen Rahmenbedingungen und des dadurch verursachten schwindenden Interesses der Branche an Investitionen mussten etliche Vorhaben des Programmes Kleinwasserkraftwerke aufgeschoben wer-

den. Um der Lähmung der Branche entgegenzuwirken, intensivierte das Programm Kleinwasserkraftwerke nach den Energieabstimmungen die Beiträge an **Planungsarbeiten**.

Ein weiterer Schwerpunkt lag in der **Vorbereitung der Marktöffnung**, vor allem mit Konzeptarbeit für eine Umweltzertifizierung. Angesichts des noch verschwindend kleinen Marktes (es wurde landesweit erst rund eine Gigawattstunde Strom aus Kleinwasserkraftwerken mit freiwilligem Aufpreis an die Endkunden im Ökostrommarkt abgesetzt) setzt die Branche der Kleinwasserkraftwerke mehrheitlich auf gesetzliche Regelungen:

- UPP: auf den Erhalt der gesetzlichen Vergütungsregelung

- Übrige: mit dem EMG auf die kostenlose Durchleitung für Energie aus Kleinanlagen.

Ein kleiner Teil der Betreiber wird hingegen absolut auf den Ökostrommarkt angewiesen sein:

- diejenigen, welche die gesetzlichen Vergütungen oder den Durchleitkostenerlass nicht erhalten,
- oder jene, welche mit diesen Vergünstigungen keine volle Kostendeckung erreichen.

Wegen vielfältiger Schwierigkeiten in der Branche konzentrieren sich viele Promotoren erneuerbarer Energien auf **konfliktfreie Segmente** wie z.B. Trinkwasserkraftwerke. Dies ist letztlich fatal, weil sowohl ein weiterer Rückbau auf dem Spiel steht, als auch ein beachtliches umweltfreundliches Potential an Erneuerungen, Erweiterungen und Reaktivierungen brach liegen bleibt. Das Programm Kleinwasserkraftwerke gibt hier Gegengewicht.

TECHNISCHE ZIELE

Es gibt eine Reihe technischer Innovationen, welche der Kostensenkung von Kleinwasserkraftwerken dienen könnten. Die Titelillustration zeigt Initiativen des letzten Jahrzehnts aus Europa. Einzelne haben den Marktdurchbruch erreicht: z.B. elektronische Lastregler und Kompakt-Turbinensets für Hochdruck. Andere blieben auf Nischenanwendungen beschränkt.

Die meisten Innovationen scheiterten, weil sie wirtschaftlich den inzwischen standardisierten und deshalb kostengünstiger gewordenen "klassischen" Lösungen unterlegen waren, oder weil die Entwicklungsfirmen schlichtweg die Durststrecke bis zur Fertigentwicklung nicht durchhielten.

Die grössten Chancen liegen dort, wo der Handlungsbedarf für Kostensenkungen am grössten ist: bei sehr kleinen Gefällen oder / und sehr kleinen Leistungen.

Neue technische Ansätze im Bereich des **Maschinenbaus** sind: Herstellverfahren, Einsatz von Kunststoffen, kostengünstigere hydraulische Konturen, elektronische Drehzahlregelung statt Regelung mit Schaufelverstellung, Kompaktbauarten, "Schmutziggwasserturbinen", wassergeschmierte Lager, Aussenkranzgeneratoren, Neukonzeption des Wasserrades usw. Es gibt jedoch auch neue Ansätze beim Wasserbau. So hat sich z.B. das Schlauchwehr bereits eine Nische erobert. Handlungsbedarf gibt es bei Fischaufstiegshilfen, Fischabweisung und Kompaktbaukonzepten.

Da das Potential für Kostensenkungen respektabel ist, fördert das Programm Kleinwasserkraftwerke solche **Pilot- und Demonstrationsanlagen** sowie Entwicklungsarbeiten. Angesichts der hoch gelegten Messlatte der voll entwickelten "klassischen" Turbinen und Kraftwerke sind die Projekte allerdings sehr risikobehaftet.

SCHWERPUNKTPROJEKTE

Zwei risikoreiche Innovationsprojekte wurden weitergeführt. Ebenfalls weitergeführt wurden die qualitätssichernden Projekte und die Entwicklung von Niederdruckturbinen. Ein Projekt für das Erarbeiten eines Modells für die Umweltzertifizierung wurde gestartet. Die Erfahrungen des Ende 1999 in Betrieb gesetzten Saugheber-Kraftwerks wurde breit umgesetzt. Im weiteren wurden etliche kleine Projekte von lokalen Promotoren weiter verfolgt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

UMWELTZERTIFIZIERUNG

Nach einer Phase der Konzeptarbeit wurde ein Projekt der EAWAG gestartet. Es wird ein Modell zur Umweltzertifizierung für Kleinwasserkraftwerke entwickelt. Dieses basiert auf den Grundlagen und Modellen des Vereins für umweltgerechte Elektrizität (VUE) und der EAWAG für die Zertifizierung von grösseren Wasserkraftwerken.

Seitens des Programmes Kleinwasserkraftwerke wurden insbesondere die folgenden Vorgaben gegeben:

- Priorität soll eine objektive Nachhaltigkeitsbewertung haben (über Publikumsvorlieben zu stellen).
- Aufwand und Kosten sollen verhältnismässig sein.
- Die Zertifizierung soll aktive Beiträge zur Lösung der Konflikte von Nutzen und Schützen liefern, insb. bei altrechtlichen Kraftwerken.
- Es soll Raum gelassen werden für eine Typen-

zertifizierungen der standardisierbaren Kraftwerke (wie zum Beispiel kleine Trinkwasserkraftwerke und aller kleinste Anlagen).

- Möglichst keine negativen politischen Signale betreffend nichtzertifizierten Anlagen.

Um die Branche einzubeziehen, wurden Anfragen für Pilotzertifizierungen gestartet, sowie eine breite Vernehmlassung und ein Workshop durchgeführt. Der Schlussbericht wird im Frühjahr 2001 erscheinen. Danach wird der VUE oder eine andere Trägerschaft zu entscheiden haben, ob und in welcher Form sie das Modell lancieren will.

INFORMATION UND BERATUNG:

Die Information & Beratung war einer grossen Nachfrage ausgesetzt. Vermehrt leiten andere Verbände und Institutionen Anfragen an das Programm Kleinwasserkraftwerke und ISKB / ADUR weiter. Obwohl

nach einem strikten Holprinzip und mit Zurückhaltung bei den Dienstleistungen gearbeitet wurde, mussten die Budgets für die zweiten Jahreshälfte höher angesetzt werden. Die Beratungsunterlagen mussten ergänzt werden. Vermehrt fragten auch Medienschaffende, Studienarbeitende, Anwälte, Investoren, Kraftwerkverkäufer und Kaufinteressenten, zukünftige Ökostromverkäufer und Ingenieure an.

Dies zeigt die aktuelle Verlagerung von Planungs- und Betriebsfragen weg zu:

- Konfliktbewältigung
- Finanzierungsfragen
- der sich anbahnenden offenen Marktsituation.

Parallel zum Programm Kleinwasserkraftwerke bearbeitete der ISKB wöchentlich durchschnittlich zwei Fälle kostenloser Information & Beratung - zu einem Teil für seine Mitglieder, zum anderen Teil zwecks Mitgliederwerbung auch für Nichtmitglieder.

FÖRDERUNG VON PLANUNGSARBEITEN

Die "altbewährte" **Vorstudienförderung** wurde fortgesetzt. Die Nachfrage fiel jedoch noch weiter als in den Vorjahren zusammen: Wurden in den guten Mitte Neunziger-Jahren gegen 20 Gesuche pro Jahr eingereicht, so waren es 1998 nur 8, 1999 noch 6 und im Berichtsjahr nur noch drei Gesuche (!). Nur die Nachfrage nach der unverbindlicheren Vorstufe der Grobanalyse blieb fast unverändert.

Als mit dem negativen Ausgang der Energieabstimmungen die Chancen vieler Projekte auf eine kostendeckende Realisierung geschwunden waren, reagierte die Projektleitung mit einer graduellen Erhöhung des Beitragsatzes an Vorstudien: Die Sätze sind nun für kleinere Kraftwerke höher angesetzt. Da bei Pico-Kraftwerken oft auch kaum genügend finanzielle Mittel für die Vorfinanzierung bis zur Konzessionserteilung vorhanden sind, wurde die Beitragsberechtigung auf das Konzessionsprojekt erweitert. Die Erweiterungen geschahen im Bewusstsein, dass mit einem erneuten Anziehen des Marktes rasch eine Budgetknappheit entstehen kann.

Im Jahr 2001 wird die Projektleitung deshalb zusätzliche Kriterien entwickeln müssen, damit die knappen Budgetmittel auf die Bereiche mit akutem Unterstützungsbedarf und Umsetzungspotential gelenkt werden.

Das Programm Kleinwasserkraftwerke verfügt damit unter dem Vorbehalt der Budgetknappheit über ein lückenloses Instrumentarium zur Stützung von Initianten und zögerlichen Bauherren von der ersten Projektidee bis zur Vorstudien, bei Kleinstanlagen bis zur Konzession. Für die Realisierungsphase hingegen können nur sehr ausgewählte P+D-Projekte unterstützt werden.

PILOT- UND DEMONSTRATIONSPROJEKTE

In der Zentrale „Fuhren“ der Kraftwerke Oberhasli (KWO) wurde eine Demonstrationsanlage für eine Druckumwandlungstechnik ohne rotierende Maschinen eingerichtet - quasi eine 1:1 Versuchsanlage (Abb. 2). Sie beruht auf Hochgeschwindigkeits-Doppelkonen (Abb.1)



Abb.1: Hochgeschwindigkeits-Doppelkonen

Die Doppelkonen wurden in einem neu eingerichteten Labor entwickelt. Die Anlage in Fuhren wird im Frühjahr 2001 in Betrieb gehen. Erste Resultate der Messungen sind Ende 2001 zu erwarten.



Abb. 2: Demonstrationsanlage der Zentrale „Fuhren“

Etliche kleinere **Demonstrationsprojekte** wurden weitergeführt und harren noch der Umsetzung: ein drehzahlvariables Wasserrad (zum Zweck der besseren Becherfüllung und damit höherem Wirkungsgrad), ein Pico-Niederdruck-Kraftwerk mit Kompaktturbinen usw.

Ein Projekt für eine **Niederdruckturbine** in extrem vereinfachter Bauweise stiess auf technische Schwierigkeiten - es wird im Folgejahr ausgewertet.

Mit dem erfolgreichen Demonstrationsprojekt grosser **Saugheberturbinen** in der Papierfabrik Perlen konnte eine ausserordentliche Resonanz in der Fachwelt erzielt werden. Der Schlussbericht wurde erstellt.

QUALITÄTSFÖRDERUNG

Im Kleinturbinenlabor MHyLab in Montcherant wurde die Entwicklung von Kleinturbinen und deren Anwendung fortgesetzt. Die Reihe der Peltonturbinen ist fertig entwickelt - sie wurden bereits in vielen Pro-

jekten eingesetzt, die Reihe der Niederdruckturbinen kommt 2001 ins Stadium der Laborversuche.

ALLGEMEINE TÄTIGKEITEN

Der 1999 erarbeitete Zeitungsartikel über Kleinwasserkraftwerke wurde nach und nach in den verschiedensten Regional- und Fachzeitungen abgedruckt - ein derartiger Erfolg ist einmalig.

Letzlich war es nur dank synergetischer Tätigkeiten ausserhalb des Mandates für die Programmleitung möglich, die Informationsflut zu bewältigen, die Branche der Kleinwasserkraftwerke einigermaßen zu betreuen und damit zur Fortsetzung des Wachstums der neunziger Jahre beizutragen. Dazu gehörten vor allem die Mitgliederarbeit, die Redaktion "Das Kleinkraftwerk" und die Mitarbeit in den folgenden Institutionen resp. Veranstaltungen: Kommission Wasserkraft des Verein für umweltgerechte Elektrizität (VUE), Vorstand der Agentur Erneuerbare Energien AEE, Arbeitsgruppe der industriellen Ei-

genproduzenten (Elektrizitätswerke, VSE), Kommission für Anschlussbedingungen der unabhängigen Produzenten (KAP), Stiftungsrat MHyLab., Fachtagungen, europäische Institutionen usw. Die meisten dieser Tätigkeiten wurden im Rahmen des ISKB abgewickelt.

AUFGESCHOBENE TÄTIGKEITEN:

Teilweise aus Budgetmangel, wegen der schlechten Rahmenbedingungen und wegen der Prioritätenverschiebung wurden etliche Vorhaben aufgeschoben, unter anderem die Ergänzung der Presseauswertung 1985-1997 über den Zubau im Bereich der Kleinwasserkraftwerke unter 300 Kilowatt und die Aktualisierung der Homepage www.smallhydro.ch (beides auf das Folgejahr verschoben), sowie aktive Promotionsmassnahmen in bestimmten stagnierenden Segmenten wie z.B. Abwasserkraftwerke (bis zur Abstimmung EMG verschoben).

Bewertung 2000 und Ausblick 2001

Vorderhand ist noch mit dem fast faktischen Investitionsstop in Wasserkraft zu rechnen. Mittelfristig kann jedoch eine Erholung eintreten:

- Angesichts der wachsenden Wirtschaft warnen Experten bereits vor einem Produktionsdefizit in Europa.
- Die Europäische Union hat zum Ziel, die Produktion aus erneuerbaren Energien einschliesslich Kleinwasserkraftwerke unter 10 MW bis ins Jahr 2010 zu verdoppeln, und in einigen Nachbarländern bahnen sich Märkte für Zertifikate "grüner Energie" an.

Diese Markttendenzen werden nicht ohne positive Auswirkungen auf die Kleinwasserkraftwerke in der Schweiz bleiben.

Technische Neuerungen haben angesichts des hohen Entwicklungsstandes der Wasserkraft einen äusserst schweren Stand. Dies obwohl die Technologie weitgehend für **Grossmaschinen** optimal ist und deshalb im Kleinkraftwerkbereich **Handlungsbedarf und Potential für kostengünstigere Lösungen** bestehen. Es sind nur wenig Neuerungen reif für die Markteinführung. Unter all diesen Bedingungen erstaunt es nicht, dass die etablierte Branche wenig Interesse an P+D-Projekten zeigt, sich jedoch Newcomers in Innovationen versuchen.

Ein "harter Kern" der UPP setzt auf den (langfristigen) Fortbestand der Vergütungsregelung im Energiegesetz oder gleichwertiger Lösungen. Diese investieren weiterhin in Kraftwerke bis 1 MW, wollen jedoch keine technischen Risiken eingehen.

Unter dem Aspekt der beschränkten Fördermittel be-

schränkt sich die **Strategie der Programmes für Pilot- und Demonstrationsprojekte** auf erfolgsversprechende Punkte und auf langfristige Ziele:

- Umsetzung bisheriger P+D-Projekte
- Entwicklung von kostengünstigem Know-how für KMU, insbes. zwecks Qualitätsverbesserung
- (Risikoreiche) Innovationen: zur Zeit Kleinprojekte mit KMU und an einer Fachhochschule
- Unterstützung von Abklärungs- und Planungsarbeiten
- Modelle für Trägerschaft, Finanzierung und Energievermarktung (insbes. Umweltzertifizierung).

Die Vermarktung des **Umweltzertifikats** "naturemade" wird breit anlaufen. Für Kleinwasserkraftwerke wird ein gleichwertiges Zertifikat fertig entwickelt und unter günstigen Umständen auch auf dem Markt eingeführt. Fragen betreffend der Harmonisierung mit anderen bereits eingeführten Zertifizierungen und mit europäischen Zertifikaten, sowie die Typenzertifizierung von sehr kleinen und standardisierbaren Kleinwasserkraftwerken (insbes. Nebennutzungs-Kraftwerken) sollten angegangen werden.

Erste auf die Marktöffnung hin konzipierte Strommarken und Produkte werden breit lanciert, worin auch **Ökostromprodukte** enthalten sind. Es ist zu erwarten, dass fast alle Elektrizitätsverteilunternehmen Ökostrom anbieten werden, und sehr viele von ihnen aktive Ökostrombörsen betreiben werden - voraussichtlich auch mit Strom aus Kleinwasserkraftwerken. In diesem Bereich kann das Programm Kleinwasserkraftwerke die Produzenten beraten.

Die **Information und Beratung** sollte reorganisiert werden, damit sie trotz vermindertem Budget der Nachfrage gerecht wird.

Eine Beruhigung der Branche ist angesichts des gegen das Elektrizitätsmarktgesetz ergriffenen Referendums nicht zu erwarten. Erst die Annahme des Gesetzes und die zugehörige Verordnung (System- und Durchleitkosten!) werden neuen Schwung in die Branche bringen. Fällt das Gesetz vor dem Volk durch, so wird die Stagnation anhalten, bis neue politische Signale kommen. **Eine breite Vorwärtsstrategie des Programmes Kleinwasserkraftwerke wird erst sinnvoll sein, wenn dies entschieden ist.**

Wird das **Elektrizitätsmarktgesetz** in der Volksabstimmung angenommen, so verbessert sich folgendes:

- Mit der Finanzierung der auf dem Energiegesetz beruhenden Vergütungen durch die nationale Netzgesellschaft (anstatt wie bisher durch das betroffene EVU) werden die UPP besser abgesichert. (Für Kraftwerke bis 1 MW beläuft sich die Vergütung in Praxis **zwischen 15 Rp./kWh im Mittelland und 12 Rp./kWh in hohen Berglagen**. Dieses Förderinstrument deckt ca. ein halbes Prozent der schweizerischen Stromproduktion ab. Diese Nische wird jedoch etwas wachsen.)
- Die bestehende Vergütungsregelung für Wasserkraftwerke über 1 Megawatt ist im offenen Markt schwierig zu deuten. Das Bundesamt für Energie plant deshalb, die entsprechende Empfehlung zu

revidieren

- Freie Durchleitung für Kleinwasserkraftwerke bis 500 kW wird den Werken, welche keinen Anspruch auf die gesetzlich festgelegten Vergütungen haben, einen vergleichbaren Kostenvorteil bringen. (Die beiden Förderungen sind nicht kumulierbar).
- Dank dem sofortigen Marktzugang und der vorgesehenen Differenzierung der Durchleitkosten (und Systemdienstleistungen) können die durch die aufgezählten Vergünstigungen nicht genügend abgedeckten Produzenten unter guten Chancen auf den Ökostrommarkt setzen. (Durch die Vergütungsregelung wird ein Überangebot im Ökostrommarkt verhindert. Der freiwillig zu zahlende Aufpreis wird sehr viel niedriger sein, und folglich kann die abgesetzte Menge ein Vielfaches erreichen.)
- Ein kleiner Aufpreis wird durch das Qualitätsmerkmal "Wasserkraft" erzielbar sein, ein etwas grösserer für umweltzertifizierte Energie.
- Für die Erneuerung gibt es Darlehen des Bundes, sofern Ökologie und Wirtschaftlichkeit verbessert werden, und für Härtefälle gibt es Darlehen zur Deckung der nichtamortisierbaren Investitionen.

Trotz diesen Massnahmen wird es für grössere Kleinwasserkraftwerke recht schwierig sein, sich zu behaupten, insbes. für neuere Niederdruck-Kraftwerke.

Referenzen

DRUCKSACHEN

- Demonstrationsprojekt Saugheber - Turbinen Perlen
- Wasserturbinenanlage Papierfabrik (WTA-PF)
- Erneuerung und Reaktivierung
- Ultraniederdruck - Kraftwerk
- wirtschaftlich-technologische Innovation

Die Drucksachen sind bei ITECO Ingenieurunternehmung AG, Postfach, 8910 Affoltern am Albis zu beziehen.

"Das Kleinkraftwerk / "La petite centrale", erscheint dreimal jährlich beim Interessenverband Schweizerischer Kleinkraftwerk-Besitzer (ISKB), Postfach, 8910 Affoltern am Albis.

INTERNETSEITEN:

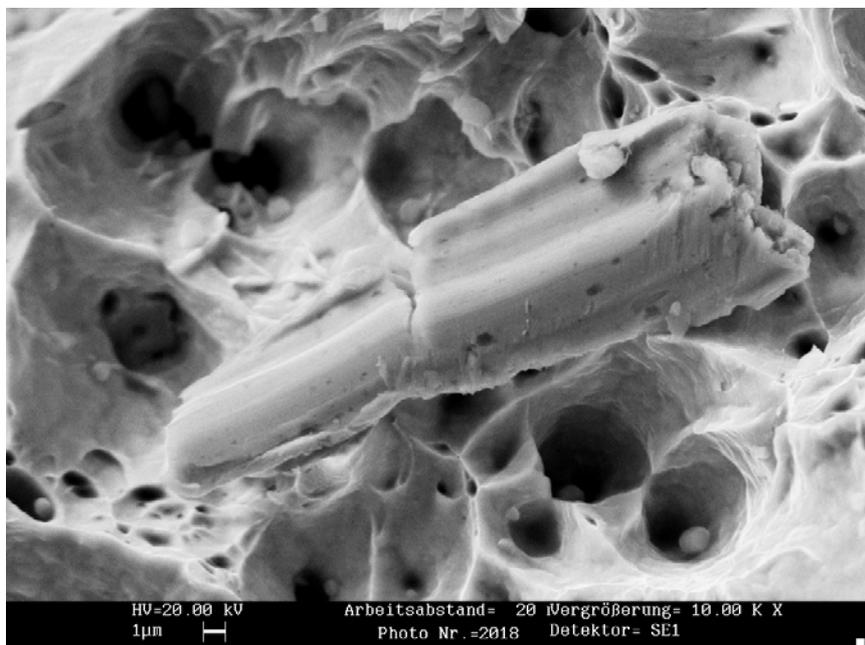
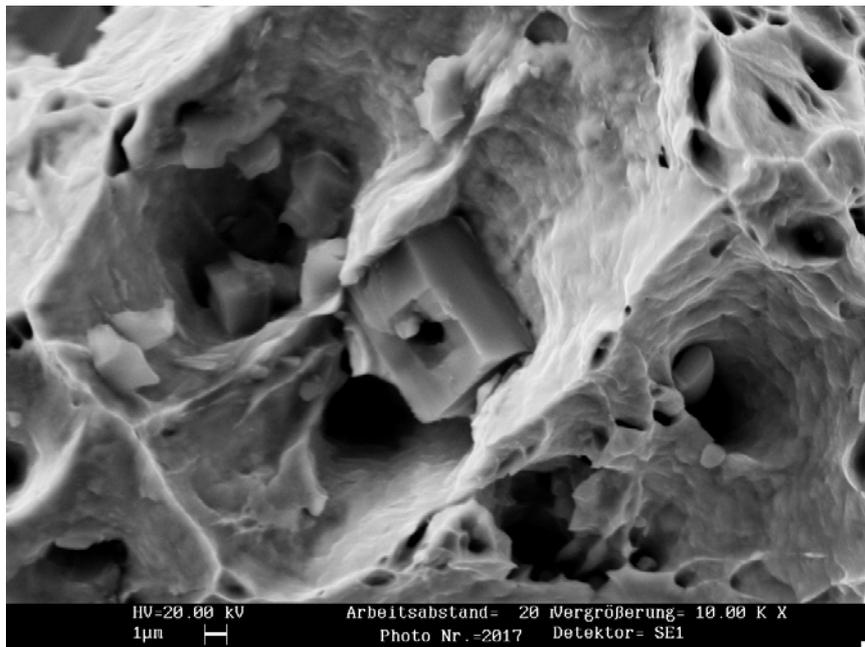
- | | |
|--|--|
| www.smallhydro.ch | Internet-Seite des Programms Kleinwasserkraftwerke (Formulare und Unterlagen für Beitragssuche) |
| www.infoenergie.ch | öffentliche Energieberatung (Publikationsreihe PACER und DIANE Kleinwasserkraftwerke) |
| www.iskb.ch | Internet-Seite des Interessenverbands schweizerischer Kleinwasserkraftwerk-Besitzer (ISKB) (Aktualitäten, Lieferanten und Verbandsinformationen) |
| www.ambios.ch/mhylab | Kleinturbinenlabor |
| www.naturmade.com | Verein für umweltgerechte Elektrizität (VUE) (Umweltzertifizierung) |
| www.eawag.ch | Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) (Grundlagen für die Umweltzertifizierung von Wasserkraftwerken) |

NUKLEARE SICHERHEIT UND ENTSORGUNG

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 2000

Wolfgang Kröger

wolfgang.kroeger@psi.ch



Frühwarnung für Ermüdung in Austenitstählen:

Wabenstrukturen mit eingesteckter (oben) und aufliegender (unten) Martensitnadel, Aufnahmen mit Raster-Elektronen-Mikroskop

Programmziele

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 Rückhalte-mechanismen 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 Rahmen 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 35 % der Vollkosten werden durch die Elektrizitätswirtschaft (UAK und Nagra), das BFE (bzw. die HSK) sowie dem BBW für die EU-FTE-Rahmenprogramme gedeckt. BFE/HSK steuern ca. 7% der Drittmittel für regulatorische Sicherheitsforschung bei; darauf geht der nachfolgende Jahresüberblick der HSK nochmals gesondert ein.

Nachfolgend werden einzelne Ergebnisse der verschiedenen Projekte dargestellt, die stellvertretend für den Inhalt der Arbeiten insgesamt stehen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

SICHERHEIT UND SICHERHEITSBEZOGENE BETRIEBSPROBLEME SCHWEIZERISCHER KERNKRAFTWERKE

STARS [1]

Das Projekt STARS, das in Zusammenarbeit und mit Unterstützung der HSK durchgeführt wird und dessen Phase III im Berichtsjahr abgeschlossen wurde, befasst sich mit der Analyse von Betriebstransienten und postulierter Störfallsequenzen in den schweizerischen KKW mit Rechen-codes, und zwar gemäss heutigem Stand der Technik, und detaillierten reaktorphysikalischen und thermohydraulischen Systemmodellen.

In der Vergangenheit wurde die Qualität der Dampfentstehungs- und -transfermodelle in den Thermohydraulik-Codes von STARS über eine Bewertung der Modelle für den stationären Voidanteil (volumetrischer Dampfanteil in 2 Phasen-Strömungen) geprüft. Viele Modelle und Korrelationen zur Voraussage der Voidverteilung (unterkühlt oder gesättigt) in beheizten Kanälen in thermohydraulischen Systemcodes wie RETRAN-3D oder Unterkanal-codes wie VIPRE-02 stammen aus und wurden validiert gegen stationären Messdaten, weil transiente Messdaten weitgehend fehlten. Es ist daher wichtig zu überprüfen, ob diese Modelle auch transiente Dampfentstehung und -transfer voraussagen können, die für die Analyse transien-ter Szenarien in Kernkraftwerke wichtig sind.

Kürzlich wurden sehr genaue Messdaten der Japanese Nuclear Power Engineering Corporation (NUPEC) veröffentlicht. Die Messungen fanden an einem Un-

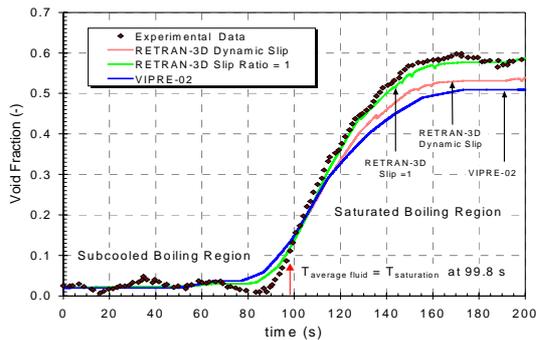
terbündel (5x5) voller Länge in einem typischen Japanischen DWR-Brennelement (17x17) statt, sowie an einem kürzeren, (1.5 m) einzelnen Unterkanal. Systemdruck, Eintrittstemperatur und -massenstrom wurden variiert und mittlere Voidanteile am Austritt der experimentellen Kanäle gemessen. Diese Messdaten wurden in STARS genutzt, um die Genauigkeit der Voraussagen in RETRAN-3D und VIPRE-02 zu analysieren und zu beurteilen.

Die Resultate der Analyse zeigten, dass die ursprünglich primär für stationäre Bedingungen entwickelten Modelle auch unter transienten Bedingungen akzeptable Voraussagen ermöglichen. Der Vergleich mit Messdaten ist gut für Transienten mit relativ langsamer Änderung der Systembedingungen (Hunderte von Sekunden), die daher als „quasi-stationär“ betrachtet werden können, sowie auch für relativ schnelle Transienten (wesentliche Änderung der Systemparameter innerhalb weniger Sekunden). Einzige Ausnahme ist die Erhöhung des unterkühlten Eintritts-Massenstromes bei gleichzeitiger transienter Überkühlung und Kondensation des Dampfes in der Nähe der Wände.

Die genauesten Voraussagen für hohe Drücke (15.5 MPa), die bei den Experimenten (insbesondere für relativ langsame Transienten) herrschten, erreichte RETRAN-3D, wenn beiden Phasen die gleiche Strömungsgeschwindigkeit auferlegt wurde, d.h. wenn der sog. Slipfaktor gleich 1 gesetzt wurde. Dieses Erkenntnis stimmt mit vielen experimentellen Beobachtungen überein, die anderswo gemacht wurden. Dies bedeutet, dass Vorsicht geboten ist, wenn Voidanteil-Profile interpretiert werden, die bei hohen

Drücken mit einem Slipfaktor wesentlich kleiner als 1 berechnet wurden.

Die grössten Unterschiede treten zwischen gemessenen und berechneten mittleren Voidwerten am Bündelaustritt auf; der wahrscheinlichste Grund dafür ist der Einfluss der Abstandhalter auf die axiale Voidverteilung. Keiner der derzeit in STARS benutzten Codes kann diesen Effekt modellieren. Für Anwendungen also, die eine genaue transiente Voidverteilung verlangen, z. B. gekoppelte Neutronik/Thermo-hydraulik-Transienten, Wiederbenetzungstransienten etc., würde die Modellierung des Einflusses der Abstandhalter genauere Resultate liefern.



Die Figur zeigt einen Vergleich der berechneten und gemessenen Veränderung des Voidanteils während einer Temperaturtransiente in einem Unterkanal.

Human Reliability Analysis (HRA) [2]

Den Schwerpunkt dieses von der HSK unterstützten Projektes in seinem vierten Jahr bildete eine Pilotstudie zur Analyse möglicher "unerwünschter Handlungen" deren Ausführung ein Unfallszenario verschlimmert. Aufgrund fehlender etablierter Analysemethoden bleiben solche Handlungen (sog. Errors of Commission, EOCs) in derzeitigen probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) weitgehend unberücksichtigt. Um deren Analysierbarkeit im Rahmen einer PSA zu untersuchen, wurde die Pilotstudie für ein schweizerisches Kernkraftwerk durchgeführt.

Ziel der Pilotstudie war (a) eine vom PSI entwickelte Methode zur Identifizierung möglicher und bedeutsamer EOCs in der Praxis zu testen sowie (b) den durch EOCs entstehenden Risikobeitrag abzuschätzen. Die vorläufigen Ergebnisse zeigen, dass die PSI-Methode praktikabel und effektiv ist: es wurden plausible Situationen, in denen EOCs auftreten können, identifiziert. Für fünf solche Situationen wurden quantitative Analysen durchgeführt, um EOC-Wahrscheinlichkeiten zu berechnen und deren Sicherheitsrelevanz zu bewerten. Solche Auswertungen werden zur Zeit in der Abschlussphase der Pilotstudie zusammen mit dem Kraftwerksbetreiber durchgeführt. Angesichts der begrenzten Anwendung und nur teilweise befriedigenden Ergebnisse anderer publizierter Methoden, ist die Anwendung der PSI-Methode und die resultierende Identifizierung konkreter Fälle ein vielversprechender Fortschritt auf dem Gebiet der EOC-Problematik.

LWR-PROTEUS [3]

Dieses vom UAK und den Kernkraftwerken unterstützte Projekt zielt auf die Gewinnung experimenteller Daten zur Validierung von Rechencodes für die Analyse und Auslegung moderner Brennelemente und Reaktorkernkonfigurationen. Dadurch lassen sich Unsicherheitsmargen reduzieren und eine bestmögliche Ausnutzung von Brennstoff und Anlage erreichen. Ein wichtiger Aspekt des Projektes ist die Nutzung kommerzieller Brennelemente, die anschliessend in Schweizer KKW eingesetzt werden; damit werden die Realitätsnähe grösser und Entsorgungskosten kleiner.

Im Berichtsjahr wurde die erste Phase des Projektes abgeschlossen. Insbesondere wurde das Element des Typs Westinghouse SVEA-96+ untersucht; wegen der breiten Streuung der verschiedenen radialen und axialen Urananreicherungen, der grossen Anzahl von Stäben mit abbrennbaren Absorbern und der Präsenz kreuzförmiger interner Wasserregionen gilt es als eines der komplexesten Brennelemente. Insbesondere zeigt es eine Anordnung mit wechselwirkenden Gadoliniumstäben, die sog. "gadolinia clusters", die bei der Modellierung etliche Schwierigkeiten bereiten.

Es wurde eine sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Verteilungen von Stableistungen erreicht. Die mit HELIOS oder CASMO-4 berechneten Verteilungen zeigten mittlere Abweichungen von den gemessenen in der Grössenordnung von 1.1% für ungestörte Bedingungen bei Moderation mit voller Wasserdichte. Es wurde damit bewiesen, dass es möglich ist, die komplexe Brennelementgeometrie zu modellieren und auch die Sicherheitsmargen zu verifizieren, die für die linearen Wärmeerzeugungsraten benutzt werden. Frühere, anderswo dokumentierte Beobachtungen wurden nun anhand der kleinen statistischen Fehler bei den durchgeführten γ -scans als klare Tendenzen identifiziert, so z. B. die Unterschätzung der totalen Spaltrate in Brennstoffstäben mit abbrennbaren Absorbern.

Auch die Empfindlichkeit wichtiger Parameter gegenüber typischen Abweichungen von den nominalen Bedingungen war Gegenstand von Untersuchungen. Es wurde beispielsweise experimentell nachgewiesen, dass eine Exzentrizität der Unterkanäle gegenüber dem zentralen Kanal von lediglich 250 μm genügt, um im unteren Brennelementbereich (der im allgemeinen gut moderiert ist) in einzelnen Stäben eine Leistungsumverteilung von bis zu 2.4% zu verursachen.

LWR-Kontamination [4]

Gegenstand dieses mit Unterstützung der HSK laufenden Projektes sind Studien zur Rolle der Wasserchemie in Reaktorsystemen bei der Aktivitätsaufnahme und dem Alterungsverhalten von Komponenten.

In diesem Jahr wurden die experimentellen Möglichkeiten samt neuem Datenerfassungssystem so erweitert, dass nun Hochtemperatur-Experimente unter Beigabe von Wasserstoff in das Kühlwasser (Hydro-

gen Water Chemistry, HWC) durchgeführt werden können. Diese Technik ist die Basis für alle Untersuchungen, die den neuen Wasserchemie-Ansatz mit Zugabe von Edelmetallen in das Kühlwasser von SWR betreffen. Bei Proben aus rostfreiem Stahl wurde unter HWC-Bedingungen die Abhängigkeit des elektrochemischen Potentials von der Platin-Oberflächenbeschichtung bei variierender Stöchiometrie von H₂ und O₂ im Reaktorwasser gemessen.

Zum Problem der radioaktiven Kontamination von Oxiden mit Co-60 laufen detaillierte SIMS-Analysen und photoelektrochemische Untersuchungen; es wird die Verteilung von Co- und Zn-Ionen in Korrosionsschichten, die sich unter SWR-Bedingungen auf rostfreiem Stahl gebildet haben, und ihres Einflusses auf die Halbleiter-Eigenschaften dieser Oxide gemessen. Ziel dieser Arbeit ist die Diffusionskoeffizienten von Co in diesen Oxiden zu bestimmen und die Halbleiter-Eigenschaften der Oxide zu charakterisieren. Die SIMS-Resultate sind vielversprechend, da sie die Voraussage des Co-Transportes in Oxiden mittels eines Diffusionsmodells ermöglichen. Die photoelektrochemische Analyse zeigt einen komplizierten Übergang des Halbleiterverhaltens der Oxidschicht vom p-Typ zum n-Typ bei der Oxidierung in Anwesenheit von Zn; die Oxidschicht behält aber den p-Typ, wenn nur Co dem Wasser zugefügt wird. Die neue photoelektrochemische Anlage steht für Untersuchungen der Halbleiter-Eigenschaften von Oxidfilmen zur Verfügung; neben der Untersuchung von SWR-Oxiden auf rostfreiem Stahl wurde eine Diplomarbeit zu Korrosionsschichten auf Zircalloy erfolgreich abgeschlossen.

In Zusammenarbeit mit dem Forschungsbereich „Allgemeine Energie“ (ENE) des PSI läuft ein Vergleich der Korrosionsschichten, die sich unter SWR-Bedingungen bilden, mit solchen in Luft bei 300 °C. Mit XPS-Analysen wurde gezeigt, dass sich während der Oxidierung in Luft auf den Stahlproben eine zweilagige Oxidschicht bildet. Jede Lage folgt einem linearen Wachstumsgesetz, wobei sich die innere schnell und die äussere sehr langsam bilden. Die äussere Lage besteht fast ausschliesslich aus Fe-Oxiden. Cr, Ni und Mo sind nur in der inneren Oxidlage zu finden. In Anwesenheit von Wasser oder Dampf wird eine verstärkte Oxidierung beobachtet (ca. ein Faktor 10 für Nassdampf und Wasser, Faktor 5 für trockenen Dampf). Ferner sind Cr und Ni auf der Probenoberfläche in verschiedenen Oxidarten anzutreffen. Für dickere Oxidschichten ist die Schichtbildung komplexer und spiegelt möglicherweise ein quadratisches Wachstumsgesetz mit anschliessender Instabilität der Schicht und deren Abbau wider.

EDEN [5]

Das Projekt EDEN (Entwicklung, Demonstration und Evaluation von Nachbestrahlungsuntersuchungen) ist fokussiert auf das Studium des mechanischen Verhaltens und der Korrosionsmechanismen von Zircalloy-Hüllrohren von Brennstoffstäben bei hohem Ab-

brand und langen Verweilzeiten im Reaktor sowie des Strahlungseinflusses auf Strukturmaterialien des Reaktorkerns. Die Untersuchungen werden im Rahmen mehrerer Vorhaben durchgeführt, z.T. unterstützt von den Schweizer KKW und der Herstellerindustrie.

Das Forschungsprojekt zur Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Hüllrohren bei hohem Abbrand mittels Zug- und Berstversuche wurde abgeschlossen. Es zeigte sich, dass die Zähigkeit der Hüllrohre stark von der kombinierten Einwirkung von Bestrahlung und Wasserstoff beeinflusst wird und drastisch abnimmt; Wasserstoff wird während des Korrosionsprozesses aufgenommen und in Form von Hydriden ausgeschieden. Bis zu einer Fluenz von 10²² n/cm² (E > 0.8 MeV) und 1'200 ppm H₂, ist die Dehnung bis zum Versagen jedoch noch grösser als 1%, was eine akzeptierte Auslegungsgrenze ist. Der Einfluss lokaler Hydrid-Akkumulierungen auf den Bruchmechanismus muss noch analysiert werden, um den Versagensprozess zu verstehen.

Die Untersuchung der Korrosionsmechanismen von Zircalloy umfasste mehrere Detailspekte:

- Die Analyse der Li-Verteilung im Oxid fortschrittlicher Legierungen: Lithium führt bei einer Anreicherung an der Metalloberfläche zu einer Korrosionsbeschleunigung. Die SIMS-Profile zeigen jedoch auch bei hohem Abbrand noch einen Li-Abfall an der Phasengrenze. Ein Vergleich mit XPS-Messungen des CEA ergab eine gute Übereinstimmung.
- Eine Untersuchung der Metall/Oxid-Phasengrenze mit hochauflösender TEM, um Information über eine mögliche Sperrschicht zu erhalten, welche den Korrosionsprozess kontrolliert: In der Phasengrenze autoklavierter Proben wurde entgegen den Erwartungen kein tetragonales Zirkonoxid gefunden, was eventuell mit der Probenpräparation im Zusammenhang steht und noch weitere Abklärungen erfordert. Aus den Gitterverzerrungen kann auf Druckspannungen von bis zu 1'500 MPa im Oxid an der Phasengrenze geschlossen werden.
- Studien der Zircalloykorrosion mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie (EIS) unter Reaktorwasser-Bedingungen. Eine Doktorarbeit zur Entwicklung einer EIS-Methode für Hochtemperatur- und Hochdruckanwendungen wurde erfolgreich abgeschlossen. Die Technik erlaubte, den Korrosionsprozess in-situ bis zu 100 Tagen zu verfolgen.

Die Untersuchung des Verhaltens von Brennstoffstäben zielte auf MOX-Brennstoff, der erstmals in einem Schweizer Reaktor bestrahlt wurde. Die Stäbe wurden bei sehr hoher Leistungsdichte betrieben und zeigten nach zwei Zyklen das erwartete Verhalten: Die Freisetzungsraten von Spaltgasen stimmte mit dem erzielten Abbrand überein. Die Untersuchung wird für höhere Abbrände fortgesetzt.

Das Auftreten von Schäden an einigen Brennstoffstäben während einer Leistungstransiente infolge einer Steuerstab-Bewegung führte zu Zweifeln an der Gültigkeit der betrieblichen Grenzen für Brennstäbe mit Innenliner, die als besonders resistent gegen solche Transienten gelten. Die Untersuchung der beschädigten Brennstoffstäbe im Hotlabor zeigte nun, dass Herstellungsdefekte als die primäre Ursache für das Versagen anzunehmen sind. Im Fall eines Stabes mit einem langen axialen Riss wurde ein Ziehfehler am Anfang des Risses gefunden. Der beschädigte innere Liner erlaubte den bei der Transiente freigesetzten Spaltprodukten das Hauptmaterial zu erreichen, was zu jodinduzierter Spannungsrisskorrosion führte. Der zweite Stab zeigte nur einen kleinen Rissansatz. Die sorgfältige metallographische Präparation des Querschnittes ergab, dass ein beschädigtes Pellet mit einem fehlenden Oberflächenstück geladen worden war, das während der Leistungstransiente genügend hohe, lokale mechanische Spannungsspitzen im Hüllrohr verursachte, um das Versagen herbeizuführen. Die Untersuchung hat somit die Gültigkeit der Betriebsgrenzen für diesen Brennstabtyp bestätigt: keine zusätzlichen Begrenzungen sind notwendig, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Auf dem Gebiet der Strukturmaterialien wurde ein Vorschlag innerhalb des 5. EU-Rahmenprogrammes akzeptiert: Es soll der Einfluss von Strahlung auf die Eigenspannungen und die Mikrostruktur in Schweißungen von rostfreien Stählen untersucht werden, um Information über die Empfindlichkeit der Materialien in Bezug auf strahlungsunterstützte Spannungsrisskorrosion zu erhalten.

Bauteilsicherheit [6]

Das Projekt Bauteilsicherheit, von der HSK und innerhalb des 5. EU-Rahmenprogrammes mitfinanziert, zielt auf die Unterstützung des sicheren Betriebes der Schweizer KKW durch verbesserte Voraussage der Rest-Lebensdauer von Komponenten. Es umfasst die Strukturintegrität grosser Stahlkomponenten unter dem Einfluss von thermomechanischen Belastungen, der Umgebung und von Strahlung. Zwei Alterungsphänomene werden derzeit untersucht:

- Umgebungsbedingte Risskorrosion (Environmentally Assisted Cracking, EAC) in niedriglegierten Stählen unter transienten LWR-Bedingungen.
- Thermische Ermüdung (Thermal Fatigue, THF) in austenitischen Rohrleitungsstählen infolge von Temperaturschichtungen in DWR-Volumenausgleichsleitungen.

In niedriglegierten Stählen können durch EAC bei gleichzeitiger Einwirkung des Reaktorkühlmittels und thermomechanischer Betriebslasten Risse entstehen und wachsen. Es wurde eine experimentelle Parameterstudie durchgeführt, um die EAC-Anfälligkeit von niedriglegierten Reaktor Druckgefäss (RDB)-Stählen unter stationären SWR-Betriebsbedingungen bei Normalwasserchemie (NWC) zu charakterisieren. Es

wurden moderne Hochtemperatur-Wasserkreisläufe, hochauflösende on-line Risswachstums-Messtechniken sowie fraktographische Analysen mittels REM eingesetzt, um den EAC-Einfluss zu quantifizieren. Die untersuchten RDB-Stähle zeigten unter rein statischer Last kein Risswachstum für ein breites Spektrum von Last- und Umgebungsbedingungen, solange Kleinbereichsfließen an der Riss Spitze vorliegt und die Wasserchemie innerhalb der festgelegten Grenzen eingehalten wird (Wasserchemie-Richtlinien des EPRI). Allerdings kann schnelles und anhaltendes Risswachstum nicht ausgeschlossen werden für schlechte Wasserchemie-Bedingungen (oberhalb des „action level 3“ des EPRI) und bei Vorhandensein einer positiven Dehnrate an der Riss Spitze. Im Gegensatz zum stationären Normalbetrieb, wurde eine ausgeprägte Anfälligkeit für dehnungsinduzierte Risskorrosion und Ermüdungsrisskorrosion unter transienten SWR-Bedingungen beobachtet.

Im Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen für Behälter und Rohrleitungen gibt es bislang keine Methoden zum Auffinden von Ermüdungsrissen in frühen Phasen der makroskopischen Rissbildung. Im Hinblick auf Leckagen in druckführenden Rohrleitungen von KKW, die auf THF zurückzuführen sind, wurde die verformungsinduzierte Martensitbildung in metastabilen austenitischen Stählen untersucht. Verschiedene Erschöpfungsgrade (Restlebensdauer, die bis zur makroskopischen Rissbildung verbleibt) bei unterschiedlichen Lastamplituden und Temperaturen wurden in speziellen Ermüdungsproben eingestellt. Die mikrostrukturellen Untersuchungen, sowohl metallographisch als auch diffraktometrisch (mit Neutronen und Röntgenstrahlen), zielen auf die Analyse der Martensitverteilung in den Proben. Die eingesetzten magnetischen Techniken, Streufeld- und Wirbelstrommessungen, waren in der Lage, Martensit in frühen Phasen der Ermüdungsschädigung zu detektieren. Bei Raumtemperatur konnte die Wirbelstromtechnik die niederzyklische Ermüdung bis zu einem Erschöpfungsgrad von 60% feststellen, die Streufeldmessungen bis zu 80%. Die magnetischen Messverfahren konnten keinen Martensit unterhalb des Erschöpfungsgrades von 60% auffinden. Dies entspricht den mit n-Diffraktometrie erzielten Erkenntnissen. Bei Temperaturen zwischen 100 °C und 300 °C gibt der Martensit ein ausreichendes Signal für die Phase der makroskopischen Rissentstehung (Erschöpfungsgrad: 100%).

Alle angewandte Methoden sind geeignet, Martensit in frühen Ermüdungsphasen aufzufinden. Während mit den Diffraktionsmethoden der Martensitgehalt quantifiziert werden konnte, ergeben die magnetischen Techniken nur relative Ergebnisse. Die n-Diffraktometrie ist die einzige Methode zur Messung von absoluten Martensitgehalten über die gesamte Dicke der Probe hindurch. Es wurde gezeigt, dass der Martensitgehalt vom Erschöpfungsgrad abhängt. Er kann daher als Indikator für das Ausmass der THF-Alterung genutzt werden. Die Untersuchungen erga-

ben weiterhin, dass Schwellenwerte sowohl für die Zyklenzahl als auch für die Lastamplitude existieren, unterhalb denen keine Martensitbildung stattfindet. Diese Schwellenwerte sind nützlich, wenn industrielle Komponenten im Betrieb untersucht werden. Für praktische Anwendungen werden Wirbelstrommessungen kombiniert mit n-Diffraktometrie empfohlen. Die Korrelation zwischen Erschöpfungsgrad und NDT-Signal wurde nachgewiesen, was für zukünftige Untersuchungen vielversprechend ist.

Forschung zu schweren Unfällen [7]

Diese Forschung, mit finanzieller Unterstützung des UAK und durch das 5. EU-Rahmenprogramm, zielt auf ein besseres Verständnis von Phänomenen, die beim Ablauf postulierter schwerer Reaktorunfälle auftreten könnten. Dadurch lassen sich radioaktive Freisetzungen in die Umgebung (Quellterme) genauer abschätzen und existierende oder neu vorgeschlagene *Accident Management*-Massnahmen verlässlicher bewerten.

Spontaner oder induzierter Dampferzeuger-Rohrbruch bei einem Auslegungsstörfall oder einem schweren Unfall kann bei gleichzeitigem Containment-Bypass zur Radioaktivitätsfreisetzung führen. Das Projekt ARTIST soll alle relevanten Aspekte der Aerosol- und Jodrückhaltung in der Sekundärseite eines DWR-Dampferzeugers (von Framatome) unter prototypischen Bedingungen untersuchen. Ein experimentelles Projekt mit 6 Phasen wurde definiert und potentiellen internationalen Partnern unterbreitet. Spezifische Kommentare, die in der Form von Letters-of-Intent eingegangen sind, wurden in das vorgeschlagene Programm eingebaut. Das Projekt ARTIST ist komplementär zum Projekt SGTR des 5. EU-Rahmenprogrammes und soll nach dessen Beendigung durchgeführt werden.

Das Projekt SGTR befasst sich mit Accident Management – Aspekten beim Dampferzeuger-Rohrbruch in Szenarien von schweren Unfällen. Es wird die Effizienz von Notfallmassnahmen, wie diese in den Richtlinien für Severe Accident Management (SAM) von DWR implementiert sind, experimentell untersucht und eine Datenbank aufgestellt, um Modelle zu entwickeln, die das Aerosol-Rückhalteverhalten der Sekundärseite des Dampferzeugers voraussagen. Das PSI untersucht mit 4 Experimenten die Aerosol-Rückhaltecharakteristiken des Rohrbündelteils eines DWR-Dampferzeugers. Die grossmassstäbliche Testanlage soll Anfang 2001 in Betrieb gehen.

Das EU-Projekt ICHEMM befasst sich mit ungelösten wichtigen Fragen zur Jodchemie. Eine davon ist, wie das bei einem schweren Unfall im Reaktorsumpf entstehende organische Jodid zu begrenzen und das entstandene flüchtige Jod in einer Form zu fixieren wären, die seinen Transport in die Containmentatmosphäre verhindert. Das PSI wird eine experimentelle Datenbank zur Zerstörungskinetik des organischen Jodids unter der Einwirkung gewisser Zusatzstoffe erstellen, bei der eine sehr effiziente Zerstörung und

Fixierung des flüchtigen Jods unter prototypischen Sumpfbedingungen erreicht wird.

Die EU-Projekte COLOSS und PHEBEN stehen in Zusammenhang mit dem Projekt PHEBUS FP. COLOSS wird Einzeleffekt- und Integraldaten zum Schmelz- und Oxidierungsverhalten von B₄C-Steuerstäben und Bündeln mit solchen Steuerstäben, in Ergänzung des PHEBUS-Tests FPT3, liefern; PHEBEN wird einige PHEBUS-Tests nachrechnen und PHEBUS-Daten für KKW-Anwendungen nutzen. Der PSI-Beitrag umfasst Planungsrechnungen und Nachrechnungen für einen Integraltest im Rahmen von COLOSS und die Nutzung neuester Codeversionen für eine SWR-Anwendung. Darüber hinaus wird ein Modell für B₄C-Steuerstäbe entwickelt, das in den Code MELCOR für KKW-Anwendungen eingeführt wird.

Ein wesentlicher Teil des experimentellen Programmes zur radiolytischen Stabilität von AgI, das im Rahmen der schweizerischen in-kind Beiträge zum Projekt Phébus FP durchgeführt wird, ist abgeschlossen. Silber, das von Ag-In-Cd Steuerstäben bei einem schweren Unfall freigesetzt würde, galt als effiziente Senke zur Bindung von freigesetztem Jod im Sumpf eines DWR bei einem schweren Unfall. PSI-Experimente haben dagegen die Bedingungen aufgezeigt, unter welchen diese Stabilität durch radiolytische Zersetzung infolge von β -Strahlung verhindert wird. Das Ziel dieser Untersuchungen ist die Entwicklung eines entsprechenden Modells für den PSI-Code IMPAIR3, der das Jodverhalten im Containment beschreibt und seit langem auch von verschiedenen internationalen Organisationen benutzt wird.

Entsorgung radioaktiver Abfälle [8]

Die Arbeiten werden durchgeführt im Auftrag des Bundes, welcher für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung Verantwortung trägt, und in enger Zusammenarbeit mit der Nagra, welche sie auch massgeblich finanziell unterstützt. Ziel ist eine Verstärkung der wissenschaftlichen Grundlagen zur Entsorgung im Hinblick auf präzisere Aussagen zur Endlagersicherheit und auf wirtschaftlichere Lösungen. Die Kompetenzfelder sind die Chemie des Endlagersystems und der Transport von Radionukliden in geologischen Formationen unter Berücksichtigung von Rückhaltemechanismen. Viele Aktivitäten sind generisch, da sie sich mit dem Verhalten von Spurenelementen in natürlichen Systemen befassen. Die Anwendungen sind jedoch auf die nukleare Entsorgung bezogen.

In der Berichtsperiode wurde die internationale Zusammenarbeit weiter verstärkt, insbesondere eine wesentlich umfangreichere Mitarbeit in EU-Projekten. Im 5. Rahmenprogramm sind dies die Projekte ACTAF, FEBEX-II, ECOCLAY-II und GLASTAB. Die Thematik der ersten drei ist die Geochemie von Actiniden und Spaltprodukten, insbesondere deren Speziation in flüssiger Phase und deren Wechselwirkung

an der Flüssig/fest-Grenzschicht. GLASTAB behandelt die Korrosion von Abfallgläsern.

Der Fokus im Jahr 2000 lag auf Arbeiten zum Entsorgungsnachweis der Lagerung hochaktiver Abfälle und langlebiger mittelaktiver Abfälle im Opalinuston.

Es wurden thermodynamische Daten für sicherheitsrelevante Elemente evaluiert. Solche Daten werden benötigt zur Ableitung von Löslichkeitsbegrenzungen im Endlager, aber auch für die mechanistische Beschreibung der Sorption an künstlichen und natürlichen Materialien. Dazu gehört auch die Mitarbeit am NEA-Projekt zur Evaluation thermodynamischer Daten von ausgewählten Elementen mit einfachen organischen Liganden. Die neue Datenbasis löst eine solche von 1992 ab und wird im Frühjahr 2001 der Öffentlichkeit auf dem Internet zur Verfügung gestellt.

Im weiteren wurden Datenbasen erarbeitet zur Sorption von Elementen, welche in der Sicherheitsanalyse berücksichtigt werden sollen. Sorptionsverteilungskoeffizienten sind ein Mass für die Immobilität eines Elements und somit von grosser Bedeutung für die Beschreibung von Freisetzung aus dem Abfallgut und Transport von Radionukliden. Es wurden Datenbasen zusammengestellt zur Sorption an Zementmaterialien, an Bentonit als Kavernenverfüllmaterial, für ungestörten Opalinuston und für Opalinuston, welcher durch hochalkalische Wässer verändert wurde. Bei diesen Arbeiten konnte grosser Nutzen gezogen werden aus vergangenen und laufenden Untersuchungen zur Wechselwirkung von Metallen an der Flüssig/fest-Grenzschicht; solche experimentelle und theoretische Studien haben dazu beigetragen, dass Konservativitäten in den früheren Datenbasen abgebaut und realistischere projektspezifischere Unsicherheitsabschätzungen definiert werden konnten.

Im Zusammenhang mit der Endlagerung in Opalinuston steht auch ein integriertes Migrationsexperiment im Felslabor Mont Terri. Das Feldexperiment (DI-A) ist Teil des internationalen Mont Terri Projektes und wird, zusätzlich zur Nagra, von ausländischen Partnern (Enresa/Ciemat, E, und IPSN, F) unterstützt. Die Auslegung des vorgesehenen passiven Langzeit-Diffusionsexperimentes wurde abgeschlossen und eine Serie von Tracern (^3H , I, Na und Cs) für eine erste Phase von Untersuchungen im Felslabor festgelegt. Diese Feldexperimente werden ergänzt durch Laborexperimente zur Sorption und zur Diffusion, weil Experimente allein im Feld keine hinreichend belastbaren Aussagen über die Zuverlässigkeit von Modellvorstellungen über die Mechanismen beim Nuklidtransport erlauben. Diffusionszellen und Sorptionszellen kleiner Dimension wurden neu entwickelt. Sie erlauben es, den aktuellen Bergdruck zu simulieren und die Experimente in Handschuhboxen durchzuführen. Das Ziel dieser Experimente ist es auch, die Übertragbarkeit von Daten aus dem Felslabor Mont Terri auf die Situation im Opalinuston in der Standortregion Zürcher Weinland zu untersuchen.

Schliesslich ist noch zu erwähnen, dass für den Bau einer MicroXAS-Strahllinie an der Synchrotronquelle des PSI grünes Licht gegeben wurde. Mit dieser Strahllinie wird es u.a. möglich sein, verschlossene radioaktive Proben mit sehr geringer Aktivität zu messen. Die Probenvorbereitung kann in der kontrollierten Zone des Hotlabors vorgenommen werden. Die Inbetriebnahme ist für das Jahr 2003 vorgesehen; die Strahllinie wird die Möglichkeiten stark erweitern, Reaktionen an Oberflächen von natürlichen und künstlichen Materialien und die Inkorporation von Nukliden in Festphasen zu untersuchen.

SICHERHEITSBEZOGENE MERKMALE ZUKÜNFTIGER REAKTORKONZEPTE

Fortgeschrittene Brennstoffzyklen [9]

Das Projekt erreichte im Berichtsjahr mehrere Meilensteine. Im Halden-Testreaktor der OECD, dem Hochfluss-Reaktor (HFR) der EU in Petten und im PROTEUS-Reaktor des PSI wurde Inertmatrix-Brennstoff (Inert Matrix Fuel, IMF) bestrahlt, der in kleinen Mengen am PSI hergestellt wurde. Auch die Verhandlungen mit dem Japanese Nuclear Cycle Development Institute (JNC) wurden zu einem erfolgreichen Ende geführt.

Nach mehreren Jahren von Grundlagenforschung in Neutronik und Werkstoffkunde hat das PSI im Jahre 1999 plutoniumhaltigen IMF in seinen α -Labors des Hotlabors hergestellt. Das Material wurde im Jahre 2000 verpackt und zu den genannten Anlagen zur Bestrahlung versandt. In Halden wurde ein umfangreich instrumentiertes Bündel mit 3 IMF-Stäben und (zum Vergleich) 3 MOX-Stäben bestrahlt. Die Bestrahlung startete Ende Juni 2000, und die gemessenen Temperaturen stimmten mit den Voraussagen gut überein. IMF zeigte eine starke Sinterung im Brennstoffzentrum, während die äussere Geometrie und damit die Brennstofftemperaturen nahezu unbeeinflusst blieben. Messungen zur Leistungskalibrierung am Anfang und am Ende des Zyklus zeigten die Genauigkeit der vorausgesagten Isotopenvernichtung für abgebrannten IMF. Die nächsten Zyklen werden nun bei höheren linearen Wärmeleistungen stattfinden, um Daten über Materialrestrukturierung und Spaltgasfreisetzung zu gewinnen.

Die Bestrahlung im HFR liefert Informationen über den Einfluss der Verteilung des spaltbaren Materials in einer Spinellmatrix; diese Matrix sollte zu einer besseren Wärmeübertragung führen. Erste Resultate liegen ebenfalls im Rahmen der Voraussagen. Weitere Untersuchungen (Neutronenradiographien, Wechsel der Position im Reaktor) sind vorgesehen.

Die Bestrahlung im PROTEUS lieferte wertvolle Information über das Neutronikverhalten von IMF. Die an der 6. Internationalen Konferenz über IMF in Strassburg präsentierten Ergebnisse sind die ersten Bestrahlungsergebnisse weltweit.

Sicherheit Fortgeschrittener LWR (ALPHA) [10]

In der laufenden dritten Phase des ALPHA-Projektes bildet die experimentelle und analytische Untersuchung der langfristigen Nachwärmeabfuhr mittels passiver Systeme aus dem Sicherheitsbehälter fortgeschrittener LWR einen Schwerpunkt; daneben gewinnen generische Aspekte der Thermohydraulik, Anwendungen auf bestehende Reaktoren und die Weiterentwicklung vorhandener Rechenwerkzeuge zunehmend an Bedeutung und Umfang. Sechs Projekte des 5. EU-Rahmenprogrammes wurden im Jahr 2000 genehmigt und in Angriff genommen. ASTAR und EUROFASTNET zielen auf der Identifizierung von Mängeln, notwendigen Verbesserungen und Entwicklungen bei den derzeit verfügbaren analytischen Werkzeugen für LWR-Sicherheitsanalysen. HPLWR will die Vorteile und die ökonomische Machbarkeit eines hocheffizienten LWR analysieren, der im thermodynamisch überkritischen Bereich betrieben wird. Das thematische Netzwerk CERTA soll einen konsolidierten Rahmen für den langfristigen Erhalt von Datenbanken mit Resultaten von integralen Systemuntersuchungen liefern, die für die Entwicklung und Bewertung von LWR-Analysewerkzeugen benötigt werden.

NACUSP befasst sich mit Stabilitätsfragen in SWR und zielt ultimativ auf die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit heutiger und zukünftiger KKW mittels höherer Flexibilität, besserer Verfügbarkeit und erhöhter Zuverlässigkeit der stabilitätsbezogenen Sicherheitsmargen. Stabilität der Naturkonvektion bei niedrigem Druck und Massenstrom ist ein Schlüsselaspekt bei den meisten fortgeschrittenen SWR hinsichtlich der Anfahrphase und der Langzeitkühlung des Reaktorkernes. Die PSI-Beiträge umfassen experimentelle Untersuchungen der Naturkonvektionsmerkmale in der Grossanlage PANDA, Vor- und Nachrechnungen mit thermohydraulischen Systemcodes und die Analyse spezifischer Aspekte der Experimente mit einem CFD-Code. Zur Stabilität heutiger SWR werden detailliertere Analysen von Instabilitätsereignissen in drei im Betrieb stehenden KKW (einschl. Leibstadt) und eine Bewertung diesbezüglicher Codes durchgeführt, sowie neue, effiziente Analysewerkzeuge entwickelt.

TEMPEST fokussiert auf den Einfluss leichter nicht-kondensierbarer Gase auf die Leistungsfähigkeit passiver Containment-Kühlsysteme und das Containmentverhalten bei einem schweren Unfall. Eine neue Datenbank wird mittels komplementärer Integral- und Einzeleffekt-Tests mit verbesserter und detaillierterer Instrumentierung vor allem hinsichtlich dreidimensionaler Phänomene generiert. Im analytischen Teil liegt der Schwerpunkt auf der Validierung von CFD-Codes anhand der neuen wie auch bereits vorhandenen Daten und auf der Entwicklung entsprechender Modellierungsrichtlinien. PSI wird integrale Systemtests in PANDA durchführen und Analysen mit den Codes GOTHIC und CFX liefern. Die Ergebnisse von TEMPEST werden direkt auf passive SWR-Konzepte

anwendbar sein, sind aber auch relevant für alle heutigen SWR (die mit gleichartigen Druckabbausystemen ausgestattet sind) und die validierten Analysewerkzeuge werden generell die Fähigkeit verbessern, Containmentsysteme detailliert zu berechnen.

Das vom PSI unter der Ägide der OECD/NEA-CSNI und mit finanzieller Unterstützung des PSEL durchgeführte International Standard Problem ISP-42 basiert auf speziellen Experimenten mit sechs einzelnen Phasen an der PANDA-Anlage. Es ist ein komplexes Problem, das verschiedene Stadien von Auslegungsunfällen und auslegungsüberschreitenden Szenarien umfasst; es wurde konzipiert, um die Leistungsfähigkeit von Rechencodes bei der Modellierung des Langzeitverhaltens passiver Sicherheitskühlsysteme unter verschiedenen Bedingungen zu prüfen. Neun Organisationen aus acht Ländern nahmen an Vorausrechnungen der „blinden“ Phase teil. Ein Workshop zum Vergleich dieser Rechnungen mit Messdaten fand am PSI im Juli 2000 mit 20 Teilnehmern statt. Ein umfassender Bericht mit allen 49 eingereichten Berechnungen wurde dort im Entwurf vorgestellt und besprochen. Eine grosse Anzahl physikalischer Parameter wurde für einen Vergleich ausgewählt. Im allgemeinen stimmten die meisten Voraussagen mit den Testresultaten ziemlich gut überein; die Gründe für noch vorhandene, z.T. signifikante Abweichungen zu den Messresultaten konnten eruiert werden. Die Messdaten wurden an alle Teilnehmer für ihre Nachrechnungen verteilt; die Resultate dieser Analysen wurden im Dezember 2000 eingereicht.

Auf Empfehlung der SESAR-FAP Gruppe des OECD/NEA-CSNI wurde das Projekt SETH zusammen mit GRS/Siemens (PKL-Anlage) konzipiert. Der PSI-Beitrag umfasst hauptsächlich eine Reihe von PANDA-Tests, die generische 3D-Misch- und Stratifizierungsphänomene in Multikompartiment-Anordnungen untersuchen und zur Validierung und Verbesserung von System-, Containment- und CFD-Codes dienen. Das Projekt erhielt die Zustimmung und finanzielle Unterstützung von 14 OECD-Mitgliedsländern; kleine Programmanpassungen und Vertragsverhandlungen sind derzeit im Gang.

GANZHEITLICHE BETRACHTUNG VON ENERGIESYSTEMEN (GABE)

Das multidisziplinäre Projekt **GaBE** [11] liefert wissenschaftlichen Input zu energiepolitischen Entscheidungen in der Schweiz, unterstützt internationale Aktivitäten zur vergleichenden Bewertung von Energiesystemen und entwickelt entsprechende Methoden- und Datenbanken.

Im Rahmen des China Energy Technology Program (CETP), mitfinanziert von der ABB im Rahmen der Alliance for Global Sustainability, untersucht das Projekt GaBE zusammen mit der ETHZ, der EPFL, das MIT und die Universität Tokyo, wie die zukünftige Stromversorgung Chinas nachhaltiger werden

könnte. Die direkte Beteiligung Chinesischer „Stakeholder“ an diesem Programm gewährleistet auch, dass die Ergebnisse effektiv genutzt werden. Die Arbeit betrifft die energieintensive Provinz Shandong, die von hohem Wirtschaftswachstum und entsprechend hohen Zuwachsraten der Stromnachfrage gekennzeichnet wird. Die von GaBE entwickelten Ansätze, die früher für schweizerische Verhältnisse angewandt wurden, wurden nun erweitert und den Bedingungen in China angepasst. Für die betrachteten fossilen Energieketten zeigen Lebenszyklusanalysen (LCA) und Umweltbelastungsanalysen (EIA) hohe Emissionen der wichtigsten Schadstoffe und entsprechend gravierende gesundheitliche Belastungen der Bevölkerung. Basierend auf der Simulation der Dispersion der emittierten Schadstoffe und deren Auswirkung auf der Gesundheit zeigen vorläufige Abschätzungen, dass die gesundheitlichen Schäden aus der Luftverschmutzung ca. 3 – 4% des Chinesischen BIP ausmachen. Die Risikoabschätzung zeigt, dass die Chinesische Kohle-Kette ausserordentlich hohe Mortalitätsraten aus schweren Unfällen aufweist, im Mittel 40mal höher als in OECD-Ländern. Alternativen wie saubere Kohletechnologien, Erdgas und Ausbau der Wasser- und Kernkraft werden derzeit im Rahmen der Untersuchung zukünftiger Stromversorgungsszenarien in Betracht gezogen. Sie bieten die Möglichkeit, anhaltendes Wachstum mit einem akzeptablen Umweltzustand zu vereinen.

Für einzelne zukünftige Stromerzeugungssysteme, die für schweizerische Verhältnisse von Interesse sind, wurden externe Umweltkosten berechnet und Multikriterien-Analysen durchgeführt. Sowohl bei heutigen als auch bei zukünftigen Stromerzeugungssystemen sind die Ranglisten nach totalen (internen und externen) Kosten konsistent: Wasser- und Kernkraft sind im unteren, Photovoltaik im oberen Kostenbereich. Bei diesem Ansatz werden neu detaillierte Lebenszyklus-Inventare als Leitgrösse für die Belastungsbewertung benutzt. Im Vergleich zu früher publizierten EU- und US-Studien führt dies zu höheren Werten; ebenfalls höher (und z.T. dominant) ist der Anteil von

Schritten der Energieketten ausserhalb der Stromerzeugungsanlagen.

Der Multikriterien-Ansatz erlaubt eine breite Nutzung der erworbenen Kenntnisse über die Leistungsfähigkeit der Systeme in einem Prozess, die auch die Berücksichtigung von „Werten“ zulässt. Die Resultate einer Multikriterien-Analyse basierend auf Kriterien mit entsprechendem Inhalt, wie die Bewertung der Gesamtkosten (d.h. gleich gewichtete Gesundheits- und Umweltauswirkungen und Gesteungskosten), führen zu Ranglisten die mit jenen der externen Umweltkosten sehr ähnlich sind. Eine Rangordnung basierend auf den drei Nachhaltigkeitssäulen (Ökonomie, Umwelt, Gesellschaft) ist relativ robust, wenn diese Aspekte als gleich wichtig betrachtet werden, auch wenn die Gewichtung von Kriterien 2. Ordnung (z.B. finanzielle Anforderungen, gesundheitliche Auswirkungen oder Arbeitsmarkteffekte) variiert. Das Rücken der Ökonomie in den Vordergrund priorisiert die erneuerbaren Energien; eine Betonung der Ökologie priorisiert die fossilen Systeme; eine Priorisierung gesellschaftlicher Aspekte priorisiert die Kernkraft. Entwicklungen, die darauf zielen, die Auswirkungen hypothetischer nuklearen Unfälle streng zu begrenzen, zusammen mit der radikalen Reduktion notwendiger Einschlusszeiten für nukleare Abfälle haben einen höchst positiven Effekt auf die Rangordnung der nuklearen Kette.

Die Anstrengungen, die GaBE-Resultate an Entscheidungsträger und Meinungsmacher sowie an alle, die in Energiefragen interessiert sind, zu kommunizieren, wurden über zwei weitere Ausgaben des „Energie-Spiegels“ fortgesetzt. Die erste befasste sich mit Szenarien für die zukünftige Stromversorgung der Schweiz, einschl. Optionen wie Wärmepumpen, dezentralisierte Wärme-Kraft-Kopplung und Förderung „neuer Erneuerbarer“ zusammen mit Sparmassnahmen. Die zweite Ausgabe betraf das Nachhaltigkeitskonzept und insbesondere seine Operationalisierung basierend auf einem strukturierten Kriteriensatz und quantitativen Indikatoren. Beide Ausgaben fanden ein sehr positives Echo bei interessierten Lesern.

Internationale Zusammenarbeit

- **HRA:** OECD/CSNI, GRS (D)
- **STARS:** EU-FTE-Rahmenprogramm, Purdue Univ., EPRI (USA), GRS (D).
- **LWR-PROTEUS:** CEA (F), ABB-Atom, Studsvik (S), Siemens/KWU (D), Scandpower (N).
- **LWR-Kontamination:** IAEA, VGB (D).
- **EDEN:** EU-FTE-Rahmenprogramm, ABB-Atom (S), EPRI/NFIR (USA), COGEMA/CEA/IPSN (F).
- **Bauteilsicherheit:** EU-FTE-Rahmenprogramm, FZK, Siemens/KWU, MPA-Stuttgart (D), IAEA, VTT (FIN), CEA (F).
- **Forschung zu schweren Unfällen:** EU-FTE-Rahmenprogramm, EPRI, USNRC (USA), Framatome, CEA (F), AEA Technology (UK), FZK, GRS, Siemens/KWU (D).
- **Entsorgung rad. Abfälle:** EU-FTE-Rahmenprogramm, FZK, FZR (D), CEA (F), CRIEPI (JPN).
- **Fortg. Brennstoffzyklen:** EU-FTE-Rahmenprogramm, CEA (F), JAERI, JNC (JPN), OECD/NSC und OECD/Halden (N), NRG (NL).

- **ALPHA:** EU-FTE-Rahmenprogramm, USNRC, EPRI, GE (USA), Siemens / KWU (D), OECD/CSNI.
- **GaBE:** EU-FTE-Rahmenprogramm, OECD/NEA und -/IEA, IAEA-Programme, ABB-CETP, MIT (USA); Univ. of Tokyo (JPN)

Ausblick 2001

Die dargestellten Programme sind mittel- und langfristig angelegt. Das Jahr 2000 war primär dem Aufbau der vom PSI/NES geführten Teilprojekte innerhalb der Projekte des EU-FTE-Rahmenprogrammes gewidmet. Die kommenden 2-3 Jahre werden nun vom Erarbeiten von Resultaten und Erkenntnissen in diesem Rahmen gekennzeichnet sein. In Zusammenhang mit internationalen Kooperationen ist auch die vom BFE anerbotene Beteiligung der Schweiz an der „Generation IV – Initiative“ des DOE für Reaktorsysteme der nächsten Generation zu erwähnen; diese wird über Forschungsbeiträge aus dem laufenden Programm des NES realisiert.

Auf der programmatischen Seite steht die getroffene Entscheidung im Vordergrund, das Forschungsprojekt „Fortgeschrittene Brennstoffzyklen“, insbesondere die Herstellung actinidenhaltiger Brennstoffproben per Mitte 2003 und nach Erfüllung der vertraglichen Verpflichtungen (EU, JNC) abzuschliessen. Zuvor wird die prinzipielle Machbarkeit nachgewiesen sein und die Ergebnisse werden umfassend dokumentiert. Andererseits werden im Jahr 2001 die nächsten Pha-

sen der Projekte LWR-PROTEUS und STARS in Angriff genommen.

Der NES trägt in den kommenden Jahren substantiell zur Entwicklung eines Flüssigmetalltags für Spallationsquellen bei (Projekt MEGAPIE). 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, wird der NES eine wesentliche Anstrengung aus eigener Kraft in diese Richtung unternehmen.

Im Jahr 2001 soll schliesslich das sicherheitstechnisch nachgerüstete Hotlabor des PSI wieder den vollen Betrieb aufnehmen; das Hotlabor steht primär den Projekten EDEN und Entsorgung radioaktiver Abfälle zur Verfügung, erbringt aber Dienstleistungen auch für das Projekt MEGAPIE und für die MIF-Abfälle des Bundes.

Publikationen

Im Rahmen der beschriebenen Projekte wurden 2000 mehrere Arbeiten in Fachzeitschriften und Tagungsbänden publiziert; hinzu kommen andere Arbeiten zu

Kolloquien und Seminaren. Diese sind im PSI-Jahresbericht des Forschungsbereichs NES (Scientific Report) aufgeführt.

Liste der Projekte

Alle aufgeführten Programm- und Projektleiter sind vom PSI, *Villigen*. Bei ihnen sind auch die jeweiligen ausführlichen Projektberichte zu beziehen

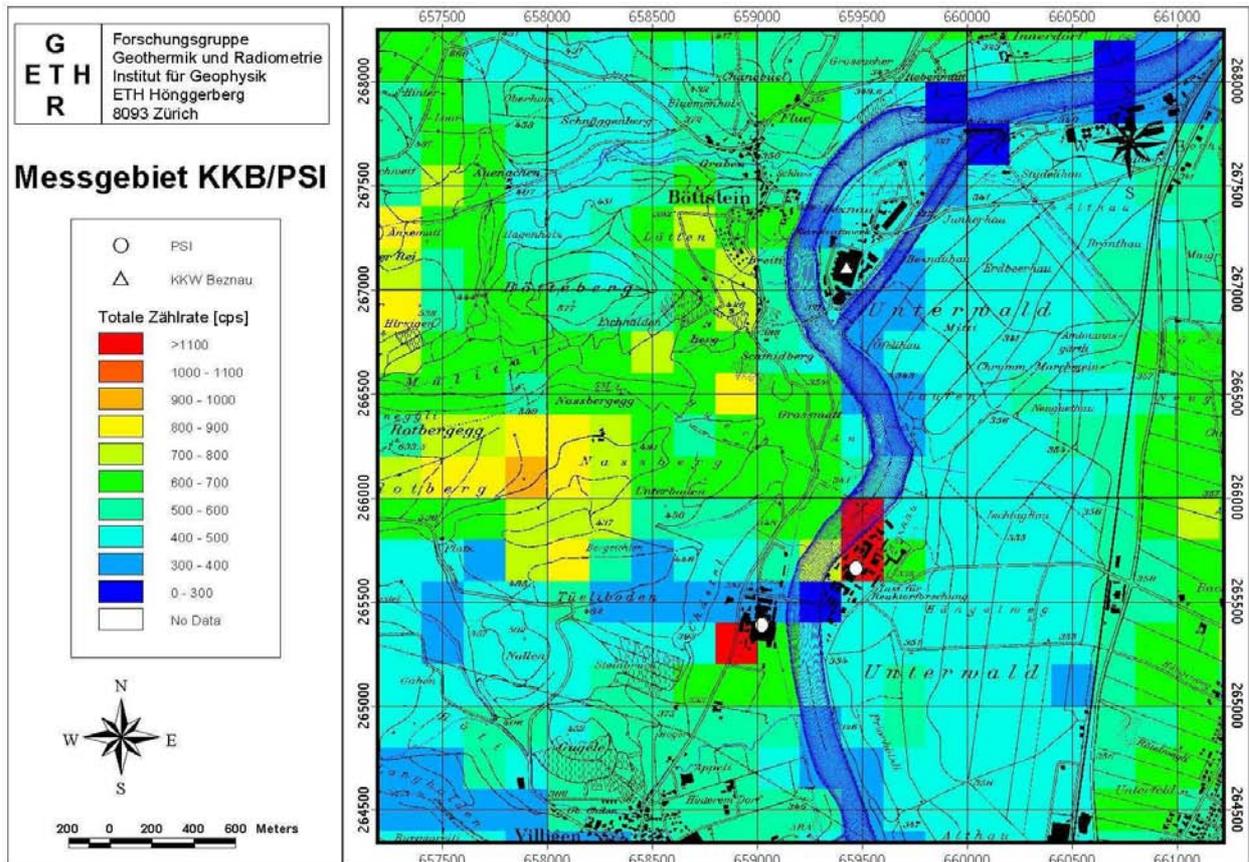
- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> [1] M. Zimmermann: <i>STARS</i> [2] V. Dang: <i>HRA</i> [3] F. Jatuff: <i>LWR-PROTEUS</i> [4] A. Hiltbold: <i>LWR-Kontamination</i> [5] F. Gröschel: <i>EDEN</i> [6] D. Kalkhof, P. Seifert: <i>Bauteilsicherheit</i> [7] S. Güntay: <i>Forschung zu schweren Unfällen</i> | <ul style="list-style-type: none"> [8] J. Hadermann: <i>Entsorgung radioaktiver Abfälle</i> [9] Ch. Hellwig: <i>Fortgeschrittene Brennstoffzyklen</i> [10] M. Huggenberger, J. Dreier, F. de Cachard: <i>ALPHA-III</i> [11] St. Hirschberg: <i>GaBE</i> |
|--|---|

REGULATORISCHE SICHERHEITSFORSCHUNG

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 2000 der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen HSK

Claude Breutel

Claude.Breutel@hsk.psi.ch



Aero-Gammaspektrometrie

Das Bild zeigt die totale Gammazählrate im Messgebiet des Paul Scherrer Instituts PSI (weisse Kreise) und des Kernkraftwerks Beznau (weisses Dreieck). Kartendaten: PK25 ©1999 Bundesamt für Landestopographie (DV1172)

Einführung

Die regulatorische Sicherheitsforschung auf dem Gebiet der Kernenergie bewegt sich in einem dynamischen Umfeld. Neue Forschungserkenntnisse lassen hergebrachte Auffassungen in einem neuen Licht erscheinen. Neue Herausforderungen rufen nach einer fundierten wissenschaftlichen Basis. Die Aufgabe der regulatorischen Sicherheitsforschung liegt hier darin, für zukünftige Anforderungen an die Sicherheitsaufsicht Grundlagen zu erarbeiten. Im Spannungsfeld zwischen Technik, Wirtschaft und Öffentlichkeit trägt die nukleare Sicherheitsforschung zu einer konstruktiven Diskussionsgrundlage bei. Die regulatorische Sicherheitsforschung steht, so betrachtet, nicht zuletzt im Dienst der Öffentlichkeit, indem sie für die

Sicherheitsbehörde wichtige Beurteilungs- und Entscheidungsgrundlagen liefert. Sicherheit ist kein statischer Begriff. Die Beurteilung eines sicheren Betriebes von Kernkraftwerken ruft nach gezielten Forschungsprojekten, welche helfen, die Sicherheitsstandards der Schweizerischen Kernanlagen laufend am internationalen Stand von Wissenschaft und Technik zu messen.

Im vorliegenden Bericht zum Forschungsprogramm 2000 der HSK spiegeln sich die breit gefächerten Aufgaben der regulatorischen nuklearen Sicherheitsforschung.

Zusammenfassung

Auf dem Gebiet des Notfallschutzes konnte im Jahr 2000 das Projekt WINDBANK mittleres Aaretal abgeschlossen werden. Mit den gesammelten Daten und den entwickelten Modellen werden zuverlässige Ausbreitungsrechnungen im Freisetzungsfall von Radionukliden ermöglicht. Das Projekt WINDBANK mittleres Aaretal schliesst eine Lücke und vervollständigt das Netz zur Prognose des Transportes von radioaktiven Substanzen, die bei einem Unfall aus einem Kernkraftwerk entweichen könnten.

Ein wichtiger Aufgabenbereich der HSK ist die Aufsicht über den Strahlenschutz in den schweizerischen Kernanlagen. Zur Unterstützung dieser Tätigkeit und zur Bereitstellung von Grundlagen führte die HSK im Jahre 2000 die bewährte Zusammenarbeit mit dem Paul Scherrer Institut (PSI) in den Bereichen Dosimetrie und Radioanalytik weiter. Ein Schwerpunkt der Radioanalytik lag im Berichtsjahr auf der bevorstehenden Inbetriebnahme des Zwischenlagers für radioaktive Abfälle ZWILAG in Würenlingen. Die Aufgabe bestand darin, noch vor Inbetriebnahme Radionuklide in der Umgebung des Zwischenlagers zu inventarisieren. Für die Dosimetrie stellte im Jahr 2000 das Inkrafttreten der Dosimetrieverordnung eine besondere Herausforderung dar. Als Vollzugsbehörde für Kernanlagen benötigt die HSK hier gesicherte technische Kenntnisse.

Für die Unterstützung der technischen Aufsicht über die Kernanlagen in der Schweiz unterhält die HSK eine Reihe von nationalen und internationalen Forschungsvereinbarungen. Am PSI wurden die Arbeiten in den Themenbereichen Wasserchemie, *Human Reliability Analysis*, Früherkennung von Ermüdungsschädigung bei Kernkraftwerkkomponenten (Projekt FEVER), Risskorrosion und das Projekt Simulationsmodelle zur Transientenanalyse (Projekt STARS) fortgeführt. Für den Einfluss der Naturkonvektion im Sicherheitsbehälter auf die kontrollierte gefilterte Druckentlastung nach einem schweren Kernschmelzunfall (Projekt REVENT II) wurde der Schlussbericht vorgelegt. Dieses Projekt wurde am Institut für Verfahrenstechnik der ETH Zürich bearbeitet. Zahlreiche Ergebnisse aus diesen Forschungsprojekten flossen nutzbringend in die Arbeit der HSK ein.

Die internationale Zusammenarbeit stellte auch im Jahr 2000 eine wichtige Komponente des regulatorischen Forschungsprogramms der HSK dar. Zu verzeichnen sind insbesondere Experimente im Rahmen des OECD Halden Reaktor Projektes, wo die Schweiz eine aktive Rolle spielt, und die Versuche im Rahmen des PHEBUS FP Projektes, wo ein Schlussbericht zu einem der durchgeführten Experimente vorgelegt wurde.

Projekte

WINDBANK mittleres Aaretal [1]

In vorangegangenen PSI Projekten sind die Windfeldsituationen im oberen und unteren Aaretal erfasst und nach meteorologischen Gesichtspunkten klassifiziert worden. Das Folgeprojekt WINDBANK mittleres Aaretal hatte zur Aufgabe, die Windfeldsituationen im mittleren Aaretal zu erfassen.

Während 4 Monaten, von Juli bis Oktober 1999, sind in einem Quadrant von ca. 30 km auf 30 km um das Kernkraftwerk Gösgen 22 Messstationen und 2 SO-DARs (*Sound Detection And Ranging*) betrieben worden. Diese temporär an wichtigen Stellen im Mittelland platzierten meteorologischen Messstationen lieferten, zusammen mit den in dieser Region fest

installierten Messstationen, den Datensatz der Messkampagne. Die jetzt errechneten Windfeldklassen werden dazu benutzt, um über den Zeitraum von 48 Stunden (24 Stunden vor und 24 Stunden nach der aktuellen Zeit) eine Ausbreitungsrechnung zur Visualisierung der Dispersion einer hypothetischen Quelle am Ort des Kernkraftwerkes Gösgen graphisch darzustellen.

Nach Abschluss dieses Projekts im mittleren Aaretal steht nun für alle schweizerischen Kernkraftwerke eine dreidimensionale Windfelddatenbank bereit. Damit wird der Notfallorganisation ein wichtiges Hilfsmittel zur Verfügung gestellt.

Ausbreitungsprognose (A-PROG) [2]

Zur Untersuchung der bodennahen regionalen Windströmungsmuster im hügeligen schweizerischen Mittelland wurde eine viermonatige, räumlich hochauflösende Intensivmesskampagne durchgeführt. Darauf aufbauend werden die Grundlagen für ein operationelles Windfeld-Informationssystem erarbeitet, das insbesondere bei industriellen, aber auch bei nuklearen Unfällen zur Berechnung der Ausbreitung von Luftfremdstoffen herangezogen werden kann. Zu diesem Zweck werden ähnliche Windströmungsmuster in Gruppen zusammengefasst und durch Windfeldklassen dargestellt. Es zeigt sich, dass Diagnosen in der Region Bern mit drei Online-Stationen in guter Genauigkeit erstellt werden können.

Das Forschungsprojekt A-PROG ist ein Bindeglied zu der Windfelddatenbank für das Aaretal (vergl. oben WINDBANK mittleres Aaretal), indem es die generelle technische Basis zur Erfassung von Windfeldklassen bereitstellt.

Methodische Weiterentwicklungen in der Aeroradiometrie [3]

Aeroradiometrische Messungen ermöglichen die Herstellung von Karten, welche die Lage radioaktiver Isotope aufzeigen. Solche Messungen liefern wichtige Informationen über das Ausmass von möglichen radioaktiven Kontaminationen der Umwelt bei Notfallsituationen oder bei radiologischen Störfällen. Ein Schwerpunkt der Arbeit der ETH Zürich ist die Entwicklung einer anwendungsorientierten Methodologie, insbesondere im Hinblick auf die Notfallbereitschaft der *Einsatzorganisation Radioaktivität* (EOR).

Ende Juni 2000 wurden die jährlichen Messflüge durchgeführt. Dabei wurde ein neues online Datenverarbeitungssystem und eine neue Kartierungssoftware erfolgreich getestet. Ein detaillierter Datenvergleich zwischen österreichischen und deutschen Aero-Gammaspektrometrie-Teams zeigte eine gute Kalibrierung der Schweizerischen Aero-Gammaspektrometrie Geräte auf.

OECD Halden-Reaktor-Projekt [4]

Das Halden-Reaktor-Projekt der OECD ist ein internationales Forschungsprojekt an dem sich über 20 Länder beteiligen und das die zwei Forschungsschwerpunkte *Brennstoff und Werkstoffe* (Fuels and Materials, F+M) und *Mensch-Maschine-Wechselwirkung* (Man-Machine-Interactions, MMI) verfolgt.

Das Projekt dient auch zur Weiterbildung von Kernfachleuten. Mit dem Jahr 2000 setzte eine neue dreijährige Forschungsperiode bis Ende 2002 ein. Besonders im Teil Brennstoff und Werkstoffe sind das PSI und die Schweizer Kernkraftwerkbetreiber namhaft beteiligt. Die HSK gewinnt aus dem Halden-Reaktor-Projekt wichtige Erkenntnisse über das Brennstoffverhalten unter verschiedenen Randbedingungen.

Brennstoff und Werkstoffe (F+M)

Kernbrennstoff und Werkstoffe werden unter Bedingungen getestet, wie sie in Kernkraftwerken bei Normalbetrieb und bei Störfällen vorherrschen. Beim Kernbrennstoff stehen Aspekte der Zuverlässigkeit und der Sicherheit im Vordergrund des Interesses, während bei den Werkstoffen deren altersbedingtes Verhalten untersucht wird.

Im Laufe des Jahres 2000 konnte der vom PSI vorgeschlagene Bestrahlungsversuch mit MOX (Uran-Plutonium-Mischoxid)-Brennstoff und uranfreiem (Inert-Matrix-Brennstoff [IMF]) Brennstoff angegangen werden. MOX Brennstoff kommt inzwischen auch in Schweizerischen Kernanlagen zum Einsatz. Zuverlässige Resultate von MOX-Brennstoffversuchen sind deshalb für die HSK von grosser Bedeutung.

Mensch-Maschine-Wechselwirkung (MMI)

Seit Anfang der achtziger Jahre wird auf dem Gebiet MMI Grundlagenforschung und angewandte Forschung betrieben. Eine Besonderheit von Halden ist die simulatorunterstützte empirische Forschung im Bereich der computergestützten Operateurhilfen. Die praktischen Anwendungen erstrecken sich über den gesamten Bereich des *Human Factor Engineering*.

Es werden sowohl neu entwickelte rechnerbasierte Unterstützungssysteme für das Kommandoraumpersonal getestet als auch das Verhalten des Kommandoraumpersonals in verschiedenen Situationen untersucht. Die Ergebnisse sind für den Betrieb von Kernanlagen von Bedeutung, indem sie zu einer Reduktion menschlichen Fehlverhaltens und generell zur besseren Prognostizierbarkeit des menschlichen Verhaltens beitragen. Sämtliche verfügbaren Methoden für die Auswertung des Operateurverhaltens wurden zu einer übergeordneten Methodik, dem "*Operator Performance Assessment System*" (OPAS) vereint. Innerhalb des "*Human Error Analysis Project*" (HEAP) wurde das OPAS für die Voraussage von Operateurfehlern in komplexen Szenarien eingesetzt. Die von Halden erzielten Ergebnisse in der Methodenentwicklung zur Messung des Operateurverhaltens sind wichtige Grundlagen für die Entwicklung von leistungsfähigeren und zuverlässigeren Modellen der Mensch-Maschine-Wechselwirkung.

Auf dem Gebiet der Sicherheit und Zuverlässigkeit von Systemen werden Methoden entwickelt, um sicherheitsrelevante Software mit höher Qualität zu programmieren und zuverlässig zu bewerten.

Simulationsmodelle zur Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz (STARS III) [5]

Mit dem Forschungsprojekt "STARS" steht der HSK

eine Gruppe von Experten am PSI zur Verfügung, die mit Rechenprogrammen deterministische Sicherheitsanalysen zur Überprüfung des Brennstoff- und Anlageverhaltens durchführen kann. Das Projekt umfasst die Bereitstellung und Validierung von geeigneten Rechenmodellen, forschungsorientierte Arbeiten sowie ad hoc Dienstleistungen für die HSK (sog. "On-Call"-Aufträge). Das Projekt STARS-III erstreckte sich über den Zeitraum vom 1. Januar 1997 bis zum 31. Dezember 2000. An das STARS-III Projekt soll sich das Nachfolgeprogramm STARS IV anschliessen. Die über das STARS-Projekt abgewickelten Arbeiten sind für die HSK von hoher Bedeutung, da die HSK nicht in der Lage ist, Störfallanalysen, die von Herstellern oder Betreibern stammen, selbst quantitativ zu überprüfen.

In der Berichtsperiode konzentrierten sich die wissenschaftlichen Dienstleistungen für die HSK auf die Post-Test Analyse des Turbinen Trip Tests für das Kernkraftwerk Leibstadt bei 109% Leistung und auf die Überprüfung der Methodik zur Bestimmung des Ausschlussgebietes im Betriebskennfeld des Kernkraftwerks Leibstadt.

Das STARS-Programm wird ausführlicher im Programmleiterbericht zur Nuklearen Sicherheit und Entsorgung besprochen.

Human Reliability Analysis (HRA) [6]

Das Projekt *Human Reliability Analysis* (HRA) läuft seit 1997 als ein vom PSI, der HSK und den Kernkraftwerken gemeinsam getragenes Forschungsprojekt. Als Bestandteil der probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) betrachtet die HRA den Einfluss menschlicher Handlungen auf den Verlauf von Stör- und Unfällen. Die HRA analysiert für den Ablauf eines Unfalls entscheidende Handlungen und ermittelt deren Fehlerwahrscheinlichkeiten.

Die HRA-Forschung befasst sich darüber hinaus seit einigen Jahren intensiv mit den inhärent dynamischen Aspekten des Operateurverhaltens bei Stör- und Unfällen. Damit leistet sie auch einen Beitrag zur Weiterentwicklung der PSA-Methodik insgesamt und dies in Richtung einer dynamischen Modellierung von Unfallabläufen.

Den Schwerpunkt der Forschung des *Human Reliability Analysis* Projekts im Jahr 2000 bildete eine Pilotstudie zur Analyse möglicher "unerwünschter Handlungen". Die Studie orientiert sich an Unfallszenarien, in welchen die Operateure Handlungen ausführen, die die Situation verschlechtern, die sog. Errors of Commission (EOCs). Aufgrund methodischer Probleme bleiben EOCs in derzeitigen PSA-Studien weitgehend unberücksichtigt. Die Pilotstudie wurde für ein schweizerisches Kernkraftwerk durchgeführt, um die Analysierbarkeit von EOCs im Rahmen einer PSA zu untersuchen.

Zu den Zielen der Pilotstudie gehörte (a) ein Anwendungstest einer vom PSI entwickelten Methode zur Identifizierung möglicher und bedeutsamer EOCs sowie (b) eine erste quantitative Abschätzung des durch EOCs entstehenden Risikobeitrags. Die vorläu-

figen Ergebnisse zeigen, dass die PSI-Methode praktikabel und effektiv ist: plausible Situationen, in denen EOCs auftreten können, wurden identifiziert. Die quantitativen Abschätzungen sind erst vorläufig und erfordern weitere Auswertungen, die zur Zeit noch in der Abschlussphase der Pilotstudie zusammen mit dem Kraftwerksbetreiber laufen. Die Anwendung der PSI-Methode und die resultierende Identifizierung konkreter Fälle ist ein vielversprechender Fortschritt auf dem Gebiet der EOC-Problematik.

Schwere Unfälle (Severe Accident Research) [7]

Versuche zur Erforschung des Anlageverhaltens bei schweren Unfällen sind äusserst aufwendig. Aus diesem Grund stellen internationale Forschungsprojekte die geeignete Form dar, den Wissensstand auf diesem Gebiet zu erweitern und daraus Rückschlüsse für die regulatorische Arbeit zu gewinnen. Ergebnisse der schweren Unfallforschung geben Hinweise auf Verbesserungsmöglichkeiten der Auslegung von Kernkraftwerken, um damit sowohl die Wahrscheinlichkeit eines schweren Unfalls noch weiter zu reduzieren als auch die Unfallauswirkungen zu mindern.

Über mehrere Jahre beteiligt sich die Schweiz inzwischen an internationalen Forschungsvorhaben, sowohl finanziell als auch durch gezielte Forschungsarbeiten zu Teilaspekten. Dies ermöglicht es der Schweiz, wichtige Informationen und Ergebnisse aus Forschungsprojekten direkt zu erhalten und Forschungsschwerpunkte mitzubestimmen.

Wichtige und interessante Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der "Schweren Unfälle" werden in den USA durchgeführt. Die Schweiz beteiligt sich deshalb im Rahmen von Abkommen mit der amerikanischen Sicherheitsbehörde (NRC) an einigen dieser Forschungsprojekte. Eine weitere Zusammenarbeit hat sich mit dem schwedischen Royal Institute of Technology ergeben, wo Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Schmelze, Wasser und dem Reaktordruckbehälter einerseits, und zwischen Baustrukturen andererseits laufen.

PHEBUS: Fission Product (FP) Programm [8]

Die Schweiz ist am PHEBUS-FP-Programm in Cadarache, Frankreich, mitbeteiligt. PHEBUS FP ist das gegenwärtig grösste internationale Programm, das sich mit der Entstehung von Spaltprodukten (Fission Products, FP) bei schweren Unfällen befasst.

Aus Schweizerischer Sicht war das Jahr 2000 durch die eingehende Beschäftigung mit der Iodchemie bei einem Kernschmelzunfall, insbesondere die Radiolyse von Silberiodid, geprägt. Das PSI führte zu dieser Fragestellung eine Reihe von wegweisenden Experimenten durch.

Im vergangenen Jahr wurde zudem die Auswertung des Experimentes FPT-1 abgeschlossen, das sich mit ausschlaggebenden Phänomenen eines schweren Kernschmelzunfalls beschäftigt hat. Es wird jetzt an der Reihe sein, einschlägige Ergebnisse daraus in Rechen-codes zu integrieren.

Wasserchemie: Kontaminationskontrolle im Primärkreislauf von Kernkraftwerken [9]

Seit geraumer Zeit bearbeitet das PSI im Auftrag der HSK Fragen der Wasserchemie und der Kontaminationsmechanismen bezüglich der Aktivitätsablagerungen auf rostfreien Stählen in den Schweizerischen Siedewasserreaktoren.

Im Berichtsjahr wurden die experimentellen Möglichkeiten des Labors so erweitert, dass auch die Auswirkung der geregelten Einspeisung von Wasser- und Sauerstoff in das Kühlwasser untersucht werden kann. Dieser Schritt war wichtig, um die Wirkungsweise der *Nobel Metal Chemical Addition Technologie* (NMCA) zu untersuchen. Neu steht ebenfalls eine photoelektrochemische Anlage zur Bestimmung der Halbleitereigenschaften von Oxidschichten zur Verfügung. Mit dieser Infrastruktur konnten Erkenntnisse zum Kobalttransport in Oxidschichten gewonnen werden. Schliesslich sind für das Berichtsjahr 2000 die ersten Untersuchungen an luft- und wasseroxidierten Stahlproben zu erwähnen. Hier sind wichtige Aufschlüsse über die elementare Zusammensetzung der Legierungselemente in den Korrosionsschichten und deren Oxidierungszustand zu erwarten.

Risskorrosion in druckführenden ferritischen Komponenten des Primärkreislaufes von Siedewasserreaktoren (SWR) [10]

Sicherheit und Lebensdauer von Leichtwasserreaktoren werden massgeblich durch die Strukturintegrität des Reaktordruckbehälters (RDB) bestimmt. Unter dem gleichzeitigen Einfluss von Reaktorkühlmittel und von thermomechanischer Belastung besteht in SWR die Möglichkeit, dass sich während des Betriebes Korrosionsrisse im ferritischen Stahl des RDB bilden und ausbreiten.

Im Rahmen des Projektes *Risskorrosion in druckführenden ferritischen Komponenten des Primärkreislaufes von SWR* wird das Risskorrosionsverhalten von ferritischen RDB-Stählen, RDB-Schweissnähten und ihrer Wärmeeinflusszonen unter transienten SWR-Betriebsbedingungen experimentell charakterisiert. Im Vordergrund steht die Ermittlung belastbarer dehnungsinduzierter Risskorrosions-Wachstumsraten, welche für erste orientierende Sicherheits- und Strukturintegritätsbewertungen verwendet werden können. Die hinsichtlich der dehnungsinduzierten Risskorrosions-Wachstumsraten besonders kritischen Korrosionssystembedingungen werden mittels einer Parametersensitivitätsstudie identifiziert und mit den möglichen SWR-Betriebszuständen verglichen. Dies ermöglicht es, kritische Komponenten und Betriebszustände zu ermitteln, die nicht durch die geltenden Regelwerke zur Ermüdungsauslegung und -überwachung konservativ abgedeckt sind. Im Rahmen einer risikoorientierten Vorgehensweise tragen die Untersuchungen mit dazu bei, Überwachungs-, Prüf- und Instandhaltungsprogramme kritisch hinsichtlich der Sicherheit zu hinterfragen. Mit dem Forschungsprojekt kann auch ein Beitrag an die Wirtschaftlichkeit von Überwachungs-, Prüf- und Instandhaltungsprogrammen geleistet werden.

Früherkennung von Ermüdungsschädigung bei Kernkraftwerkskomponenten (FEVER) [11]

Eine zentrale Herausforderung für die zerstörungsfreie Materialprüfung ist die Entwicklung von Methoden, die es erlauben, Veränderungen in der Mikrostruktur von Stählen frühzeitig zu erkennen und zu überwachen. Besondere Bedeutung erlangt die Schadensfrüherkennung im Lebensdauer-Management von einzelnen Komponenten

Im Projekt FEVER steht die Detektion von mikrostrukturellen Veränderungen, die bei niederzyklischer Ermüdung in austenitischen Stählen entstehen, im Zentrum der Forschungsaktivitäten. Besonderes Augenmerk wird der Rissbildung und dem Risswachstum im Bereich "kleine Risse" (~0.01-0.1 mm) gewidmet. Bei mechanischer Belastung vollzieht sich in metastabilen austenitischen Stählen eine deformations-induzierte Umwandlung von der Austenit- zur Martensit-Kristallgitterstruktur. Mittels Neutronendiffraktometrie konnte der Martensitgehalt quantitativ in Versuchsproben bestimmt werden. Die erhaltenen Werte dienen der Kalibrierung der magnetischen Messtechnik. Mit magnetischen Streufeldmessungen und mit Wirbelstrommessungen konnten Schwellenwerte von Ermüdungserscheinungen bestimmt werden. Als weitere Einflussgrösse wird die Martensitbildung unter verschiedenen Temperaturbedingungen untersucht.

Einfluss der Naturkonvektion im Sicherheitsbehälter nach einem schweren Kernschmelzunfall auf die kontrollierte gefilterte Druckentlastung (REVENT II) [12]

In dieser Arbeit wurde der Tropfenmitriss beim Zerplatzen von Dampfblasen an der Oberfläche einer siedenden Wasservorlage experimentell untersucht. Die experimentellen Bedingungen sind für Störfallzenarien eines Kernschmelzunfalls relevant.

Der aus integralen Messungen bestimmte Entrainment-Faktor – ein Mass für den Flüssigkeitsaustrag aus der Sprudelschicht – von löslichen Substanzen erwies sich unabhängig vom Sumpfvolumen, sowie von der Art und der Konzentration der Kontrollsubstanzen. Hingegen nimmt der Flüssigkeitsmitriss mit steigendem Betriebsdruck bei Experimenten mit Luft-Dampfatmosferaen zu, bei Experimenten mit reiner Dampfatmosferaen hingegen ab. Für Versuche mit nicht-löslichen Substanzen wurde im Gegensatz zu den Experimenten mit löslichen Modellsubstanzen keine Druckabhängigkeit beobachtet. Zudem bleibt die Konzentration der Modellsubstanz in der Containmentatmosphäre konstant, und zwar unabhängig von der Sumpfkonzentration.

In einem zweiten Schritt wurden Messungen des Tropfenaustrages in einer Blasensäule durchgeführt. Der Versuchsaufbau war derart konzipiert, dass Tropfendurchmesser und -geschwindigkeit unmittelbar oberhalb der Sprudelschicht, d.h. in der Sedimentationsschicht, vermessen werden konnten, womit der Quellterm für die Tropfenproduktion experimentell zugänglich gemacht wurde.

Zusammenarbeit in der Dosimetrie [13]

Drei Schwerpunkte prägten im Jahr 2000 die Zusammenarbeit in der Dosimetrie: die Analyse der Freimessmethodik, die Unterstützung bei der Ausarbeitung einer HSK-Richtlinie und die Umsetzung der neuen Dosimetrieverordnung.

Im ersten Schwerpunktsbereich der Freimessung von Material, das radioaktiv kontaminiert oder aktiviert sein könnte, erbrachte eine tiefgehende Analyse der Freimessmethodik mit sogenannten Freimessschranken den Nachweis, dass den Messeinrichtungen, die auf dem Prinzip der „Gesamt-Gammamessung“ beruhen, eine verglichen mit der Messung der Ortsdosisleistung frapierende Nachweisfähigkeit eigen ist. Allerdings konnte auch gezeigt werden, dass nur bei der Erfüllung sehr strikter Voraussetzungen mit diesen Messeinrichtungen eine belastbare Belegung der Inaktivität eines Gegenstandes oder Abfalles gemäss Anhang 2 der Strahlenschutzverordnung möglich ist. Als notwendig erweist sich dabei die Einhaltung qualitätssichernder Massnahmen, um eine gleichbleibend hohe Qualität der Messresultate zu erhalten.

Im Zusammenhang mit der Ausarbeitung einer HSK-Richtlinie zur Freimessung konnten substantielle Beiträge zur Eichung und Messstatistik von Oberflächenkontaminationsmonitoren erbracht werden. Die zu behandelnde Fragestellung betrifft die HSK-Überprüfung von Materialien, welche von Kernkraftwerken mit Freimessanlagen freigemessen wurden. Das Inkrafttreten der Dosimetrieverordnung und der darin geforderten Bewilligungs- resp. Anerkennungspflicht für Ganz- und Teilkörpermessplätze verliert der Kalibrierung von Triagemessplätzen in Kernkraftwerken hohe Priorität. Im Rahmen eines Auftrages an das PSI wurden im Kernkraftwerk Mühleberg Inkorporations- und Triagemessplätze kalibriert und die Erfüllung von Forderungen der Dosimetrieverordnung überprüft.

Zusammenarbeit in der Radioanalytik [14]

Die Arbeit am PSI umfasst Studien, Entwicklungsaufträge sowie radiologische und messtechnische Arbeiten. Die Zusammenarbeit zwischen der HSK und dem PSI auf dem Gebiet der Radioanalytik betrifft vor allem die Entwicklung, Optimierung und Implementierung von radiochemischen Analyseverfahren für die Bestimmung von Spezialnukliden (d.h. reine Beta- und Alphastrahler) in Umweltproben zur Immissionsüberwachung sowie zur Inkorporationsüberwachung von strahlenexponierten Personen. In den letzten zwei Jahren lagen die Schwerpunkte bei der Verfeinerung eines *Screening*-Verfahrens für den Nachweis von anthropogenen Alphastrahlern in Urin- und Stuhlproben und bei der Neuentwicklung eines Analyseverfahrens zur Bestimmung von Transuranen in Materialproben aus Kernkraftwerken.

Für das Jahr 2000 stand die Analyse von zahlreichen Bodenproben in der Umgebung der ZWILAG AG im

Mittelpunkt. Noch bevor das Zwischenlager für nukleare Abfälle seinen Betrieb aufnimmt, sollte die Umgebung des ZWILAG auf die typischen Gehalte an Photonen-Strahlern und den oben genannten Spezialnukliden untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden über 40 Bodenproben auf den Gehalt der Elemente Plutonium, Americium und Curium untersucht.

Molekularbiologische Untersuchungen zur zellulären Radiosensitivität [15]

Um ein besseres Verständnis der biologischen Wirkungsweise ionisierender Strahlung zu erhalten, fördert die HSK molekularbiologische Arbeiten am PSI. Die genauen Mechanismen, wie Zellen auf Strahlung reagieren, sind noch weitgehend unbekannt. Diese Arbeiten liefern einen Beitrag zur Erweiterung des Grundwissens im Strahlenschutz.

Im Zusammenhang mit der Reaktion von Zellen auf ionisierende Strahlung stellt sich die Frage, wie Zellen gezielt einzelne Abwehrmechanismen aktivieren. Eine Möglichkeit, die in Zusammenarbeit mit Forschern am ISREC (Lausanne) untersucht wurde, ist die selektive Aktivierung einzelner Gene über eine durch Strahlung aktivierbare Reguliersequenz (Promotor) auf der DNS. Ein solcher strahleninduzierbarer Promotor wurde lokalisiert und wird im Rahmen des Projektes experimentell charakterisiert.

Die Rolle von vascular endothelial growth factor (VEGF) und Glutathion-S-Transferasen bei der Reparatur von strahleninduzierten Zellschäden [16]

Die Neubildung und Erhaltung von Blutgefässen ist ein komplizierter Prozess, der das Überleben von Zellen nach einer Bestrahlung mit beeinflusst. Der *Vascular Endothelial Growth Factor (VEGF)* ist ein Hormon, das bei diesem Prozess eine wesentliche Rolle spielt. Es wird postuliert, dass der VEGF die Regenerierung von strahlengeschädigtem Gewebe fördert. Ionisierende Strahlung wirkt auf Organismen als Umweltstress und löst je nach Dosis und Zeit der Einwirkung Abwehrreaktionen (Reparatur) oder den Tod von stark geschädigten Zellen aus. Dabei wird der durch Strahlung in verschiedenen Biomolekülen (DNS, Lipide, Eiweisse) ausgelöste Schaden zur Aktivierung biochemischer Reaktionen genutzt, deren Wirkung über das Resultat der Bestrahlung entscheidet. Die IMR (Institut für Medizinische Radiobiologie) Gruppe am PSI hat die Funktion mehrerer Moleküle untersucht, die in diesen Abwehrmechanismen eine Rolle spielen. So konnten die Forscher die Wirkung von Strahlen durch Manipulation des biochemischen Gleichgewichts in den Zellen beeinflussen und den Zelltod in bestrahlten Zell- oder Gewebekulturen weitgehend verhindern. In der weiteren Arbeit wird ein detailliertes Verständnis der Mechanismen angestrebt, die nach Bestrahlung über Tod, Reparatur oder Entartung der Zellen entscheiden.

Bewertung 2000 und Ausblick 2001

Alle von der HSK unterstützten Forschungsprojekte haben im Jahr 2000 einen Beitrag zu einer fachlich fundierten Arbeit der Sicherheitsbehörde geleistet. Grosse Bedeutung kommt dieser Tage dem Kompetenzerhalt auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit zu. In einer Zeit, in der ein Generationenwechsel stattfindet und Know-how Träger aus dem aktiven Berufsleben ausscheiden, sind Forschungsprojekte ein wichtiger Faktor, um neue Generationen auszubilden und um damit den Wissensbestand auch hierzulande zu erhalten. Wie das breite Spektrum der Forschungsprojekte zeigt, sind die Aufgaben der Aufsichtsbehörde sehr vielseitig und die Anforderungen an sie sind berechtigterweise hoch. Umso wichtiger ist es für die Arbeit der HSK, auf qualitativ hochstehende Forschung und auf anerkannte Experten zurückgreifen zu können. Das ist nicht zuletzt auch für die internationale Vernetzung und für die Glaubwürdigkeit der Sicherheitsaufsicht notwendig. Die zahlreichen Publikationen, die im vergangenen Jahr aus den erwähnten Forschungsprojekten geflossen sind, spiegeln die internationale Ausstrahlung der Projekte und unterstreichen zugleich ihre Einbettung in die internationale Forschungsgemeinschaft.

Die Forschungsschwerpunkte der vergangenen Perio-

de werden auch im Jahr 2001 aktuell bleiben. Die meisten Forschungsprojekte sind über mehrere Jahre ausgelegt und im Jahr 2001 werden in enger Kooperation mit den Forschungsteams die vereinbarten Ziele angestrebt.

Bereits im vergangenen Jahr machten sich einige Strömungen bemerkbar, die das Jahr 2001 prägen werden. Zu begrüssen ist zunächst der sich fortsetzende Trend zur internationalen Zusammenarbeit bei grossen Forschungsvorhaben. Die Schweiz ist dabei, sich an einem neuen internationalen Projekt zur Erforschung des sicheren Verhaltens von Hochabbrand-Brennstoff zu beteiligen. Ob und wie neue Ansätze zur Regulierungspraxis die Anforderungen an die Forschung verändern, wird in naher Zukunft einer näheren Betrachtung unterzogen werden müssen. Stichworte dazu sind risikobasierte Regulierung und risikobasierte Entscheidungsfindung. Die Forschungsplanung wird sich auch mit Auswirkungen der Elektrizitätsmarktliberalisierung auf die Sicherheit auseinandersetzen müssen. Sicherheitsrelevante Konsequenzen der Marktliberalisierung müssen früh erkannt werden, um ihnen mit geeigneten Massnahmen begegnen zu können.

Liste der Projekte

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

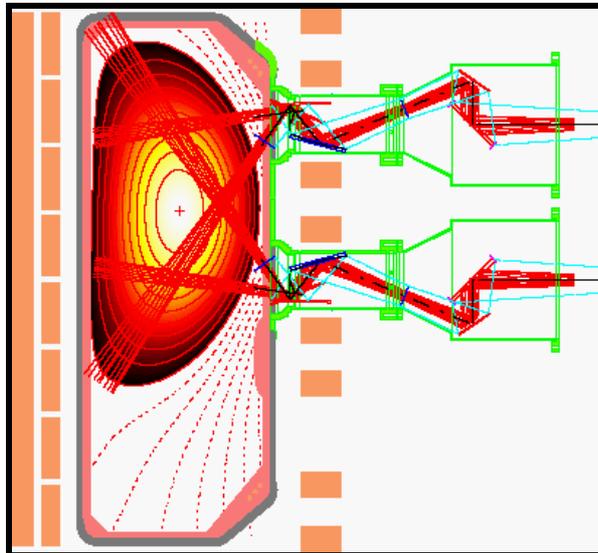
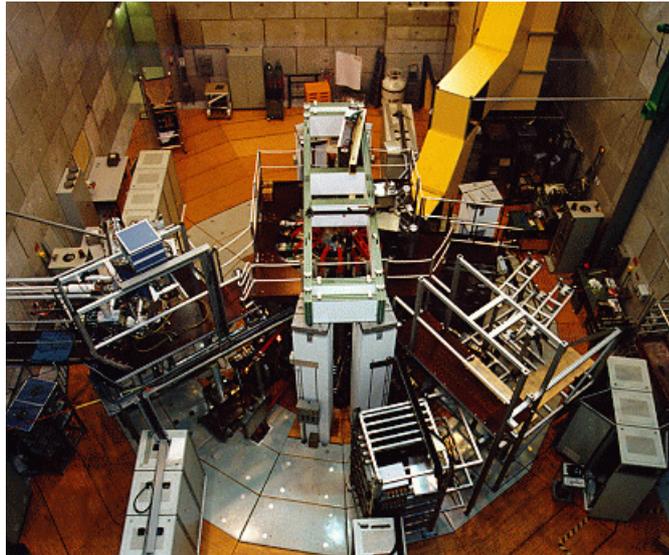
- [1] W. Graber, *PSI-Villigen*, **WINDBANK mittleres Aaretal** (SB), <http://pss100.psi.ch/~shirsch/gabe/heaia.html>
- [2] K. Kamber, *Geographisches Institut der Universität Bern, Klimatologie und Meteorologie*, **Ausbreitungsprognose A-PROG** (JB), <http://www.giub.unibe.ch/klimet/>
- [3] L. Rybach, B. Bucher, *Institut für Geophysik, ETH-Hönggerberg*, **Methodische Weiterentwicklungen in der Aeroradiometrie** (JB), ENET 9720656, <http://www.gtr.geophys.ethz.ch/>
- [4] Ch. Hellwig, *PSI Villigen*, **Fortgeschrittene Brennstoffzyklen** (JB), <http://www.external.hrp.no>
- [5] M. Zimmermann, *PSI-Villigen*, **Simulationsmodelle zur Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz (STARS III)** (ZB), ENET 9400911, http://www1.psi.ch/www_nes_hn/stars.html
- [6] V.N. Dang, *PSI-Villigen*, **Human Reliability Analysis (HRA)** (JB), ENET 9720255, <http://pss100.psi.ch/~shirsch/hra/>
- [7] *US-NRC Severe Accident*, **US-NRC: Severe Accident Programme (CSARP)**, <http://www.nrc.gov>
- [8] *IPSN Cadarache, France*, **PHEBUS Fission Products Agreement**, <http://www.ipsn.fr>
- [9] A. Hiltpold, I. Mailand, M. Nicolet, B. Gerodetti, *PSI-Villigen*, **Wasserchemie, Kontaminationskontrolle im Primärkreislauf von Kernkraftwerken** (ZB), <http://www.psi.ch/lwv/lwrc0.htm>, <http://www.psi.ch/lwv/lwrc6.htm>
- [10] H-P. Seifert, J. Heldt, U. Ineichen, U. Tschanz, *PSI-Villigen*, **Risskorrosion in druckführenden ferritischen Komponenten des Primärkreislaufes von SWR** (JB), <http://www.psi.ch/lwv/lwi1.htm>
- [11] D. Kalkhof, *PSI-Villigen*, **Früherkennung von Ermüdungsschädigung bei Kernkraftwerkskomponenten (FEVER)** (ZB), <http://www.psi.ch/lwv/lwi0.htm>, <http://www.psi.ch/lwv/lwi3.htm>

- [12] R. von Rohr, *Institut für Verfahrenstechnik, ETH Zürich*, **Einfluss der Naturkonvektion im Sicherheitsbehälter nach einem schweren Kernschmelzunfall auf die kontrollierte gefilterte Druckentlastung (REVENT II)** (SB),
http://www.rereth.ethz.ch/mavt/verfahrenstechnik/verfahrenstechnik.prof_overview.html
- [13] Ch. Schuler, *PSI-Villigen*, **Zusammenarbeit in der Dosimetrie** (JB), ENET 9401101,
http://www.psi.ch/www_ase_hn/dos_home.html
- [14] S. Bajo, *PSI-Villigen*, **Zusammenarbeit in der Radioanalytik** (JB), ENET 9300071,
http://www.psi.ch/www_ase_hn/raa_home.html
- [15] R. Jaussi, *PSI-Villigen*, **Molekularbiologische Untersuchungen zur zellulären Radiosensitivität** (ZB), ENET 9723973, http://www.psi.ch/www_imr_hn/imr_projects.html,
http://www.psi.ch/www_imr_hn/HSK_99.pdf
- [16] K. Ballmer-Hofer, *PSI-Villigen*, **Die Rolle von vascular endothelial growth factor (VEGF) und Glutathion-S-Transferasen bei der Reparatur von strahleninduzierten Zellschäden** (ZB),
http://www.psi.ch/www_imr_hn/imr_projects.html, http://www.psi.ch/www_imr_hn/HSK_99.pdf

FUSION THERMONUCLEAIRE CONTROLEE

Rapport de synthèse
sur les activités 2000 du programme de recherche

Stéphane Berthet
stephane.berthet@sso.admin.ch



Tokamak à configuration variable (TCV) au Centre de Recherche en physique des plasmas (CRPP) de l'EPF-Lausanne

En haut: vue du TCV; en bas: injection des ondes radio-fréquence (RF) pour le chauffage du TCV

Centre de gravité du Programme Fusion

Depuis quelques années, l'Europe est devenue le leader mondial de la fusion. Son Programme Fusion couvre toutes les activités de la fusion magnétique. Les brillants résultats du **JET** (*Joint European Torus*) (record mondial de puissance de fusion, avec 16 MW en 1997, démonstration d'une opération sûre des installations de manipulation du tritium) ainsi que les travaux réalisés dans les Associations ont permis de consolider les bases scientifiques et technologiques qui permettent aujourd'hui à la communauté internationale (dont la Suisse) d'entreprendre la construction d'un réacteur à fusion expérimental, étape intermé-

diaire nécessaire entre les machines présentes et un futur réacteur de démonstration produisant de l'électricité.

En Suisse, les activités dans le domaine de la fusion sont coordonnées par le Centre de recherche en physique des plasmas de l'EPF-Lausanne (CRPP/EPFL). Celles-ci sont pleinement intégrées au Programme Fusion de la Communauté européenne de l'énergie atomique (Euratom) auquel notre Pays participe de plein droit depuis 1979, via l'Association Euratom-Confédération suisse.

Vue d'ensemble du Programme Fusion au niveau international

Aux **États-Unis d'Amérique (USA)**, selon une évaluation de l'Académie nationale des sciences, la qualité de la recherche en fusion aux USA est au niveau des autres domaines des sciences physiques. Elle constate néanmoins un isolationnisme de la communauté de la fusion envers les autres scientifiques et recommande que les scientifiques de la fusion fassent un effort systématique pour réduire leur isolement scientifique. Cette évaluation demande aussi au Fond national pour la science d'augmenter sa participation aux recherches en fusion. La plupart des travaux dans le domaine de la fusion magnétique sont soutenus par un budget annuel de 250 MUSD (millions de dollars américains) provenant du *US Department of Energy* (DOE).

Au **Japon**, le *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) projette de réviser complètement son *tokamak* JT-60. L'opération pourrait durer entre 5 et 10 ans et coûtera 325 MUSD. Le réacteur sera arrêté en automne de l'année prochaine afin de remplacer les bobines magnétiques par des bobines supraconductrices. La durée de fermeture de l'installation n'enthousiasme guère les chercheurs japonais. Toutefois cela n'affectera pas l'engagement du Japon dans le projet **ITER** (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). Au contraire, puisque les économies qui seront réalisées avec la suspension des opérations du JT-60 autoriseront plus facilement une augmentation de la contribution du Japon sur **ITER**.

En **Allemagne**, le Wendelstein 7-X (W7X) de l'Institut annexe de l'Institut Max Planck pour la physique des plasmas (IPP) à Greifswald, fondé en 1994, est l'installation de fusion de type *stellarator* la plus grande et la plus moderne du monde. Cette installation est en train de voir le jour et ses nouveaux bâtiments ont été inaugurés le 7 juillet 2000. L'IPP de Greifswald et Garching (~1000 personnes) est l'un des plus grands centres européens de recherche sur la fusion. C'est le seul institut au monde où les deux principaux types d'installations de fusion – *tokamak* (Garching Asdex Upgrade) et *stellarator* (Garching W7AS et Greifswald W7X) – sont développés en

parallèle. Le W7X sera mis en service en 2006. L'investissement total pour l'Institut annexe de l'IPP à Greifswald se monte à 600 MDEM.

La **Russie** a son programme technologique fortement orienté vers **ITER**. Elle maintient un degré de coopération dans le domaine de la fusion avec les Nouveaux États Indépendants, comme l'Ukraine, la Biélorussie et la Géorgie. Le Kazakhstan participe à **ITER** via un partenariat avec la Russie.

La construction d'**ITER** (*International Thermonuclear Experiment Reactor*) telle que prévue initialement était devenue difficile. C'est pourquoi, les partenaires (Europe, Japon et Russie) décidèrent de définir un concept de machine avec un coût réduit et donc avec des objectifs scientifiques et techniques légèrement moins ambitieux. Cette étape se terminera le 21 juillet 2001 par la soumission d'un rapport contenant la description technique détaillée de la machine nommée aujourd'hui **ITER-FEAT** (*ITER-Fusion Energy Amplification Tokamak*).

L'objectif initial de **ITER** (concept 1998) était d'atteindre l'allumage (*ignition*), c'est-à-dire l'étape où une source d'énergie extérieure n'est plus nécessaire pour maintenir les réactions de fusion, le système est alors auto-entretenu. La nouvelle version de la machine, de plus petite taille, aura un plasma en fusion, mais ne permettra que d'approcher l'allumage, sans qu'il puisse vraiment être possible de déterminer si cette limite pourra être atteinte une fois. Actuellement, 96 personnes travaillent sur ce projet : 38 pour l'Union européenne (Garching), 33 pour le Japon (Naka) et 25 pour la Russie.

Le coût de la construction d'**ITER-FEAT** est estimé aujourd'hui à environ 3.5 GEURO (milliards d'EURO), c'est environ 50% du coût du concept d'**ITER** en 1998. Néanmoins, une estimation précise du coût de la construction (gestion et support) reste extrêmement difficile tant que les structures de l'organisation qui effectuera le travail ainsi que la manière de placer et de gérer les contrats restent inconnus.

Si actuellement les activités de ce projet sont supportées par l'Europe, le Japon et la Russie, il y a toujours de l'espoir pour que les USA, partenaires jusqu'en 1999, rejoigne le groupe lorsque celui-ci aura décidé d'aborder la phase de construction. Pour **ITER**, les partenaires ont à ce jour dépensé environ 1 GEURO, essentiellement pour le développement de composants de haute technologie.

Pour le **site d'ITER**, le Japon pourrait proposer 3 options à la mi-2001: Naka et Rokkasho sur l'île de Honshu et Tomatoh sur l'île de Hokkaido. Une association canadienne a aussi exprimé son intérêt de recevoir **ITER** sur le site de Clarington dans l'Ontario. Au Canada, la préparation du site (*licence*) est pratiquement faite, la fourniture en tritium ne pose pas de problème, et la barrière de la langue n'existe pas. De plus, un tel site relancerait sans doute la participation des USA au projet. Une proposition officielle sera faite en 2001. En Europe, la France, par la voix du Commissariat à l'Énergie Atomique, qui gère le Programme Fusion français, a annoncé son intérêt à accueillir **ITER** sur son site de Cadarache, près d'Aix-en-Provence. Il est évident qu'un tel projet aura un impact sur le développement de technologies de pointes et sera important pour l'industrie européenne. L'Allemagne, par la voix du directeur scientifique de l'Institut Max Planck pour la physique des plasmas (IPP) à Garching, a indiqué que **ITER** en Europe était la solution la plus attractive et ayant la plus haute priorité pour l'IPP.

Cette proposition française est venue redonner de l'élan au projet au moment où se discute le 6^e PCRDT (Programme cadre de recherche et de développement technologique) de l'UE.

En **Europe**, toute la recherche conduite dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée par confinement magnétique se déroule au sein d'un Programme intégré mis en œuvre par l'Union Européenne sur la base du traité Euratom. En terme financier le Programme Fusion représente quelque 500 MEURO par année ; approximativement 60% sont supportés par les organisations nationales et 40% par l'Union Européenne. Le budget de l'UE pour le Programme Fusion sur la période du 25.01.1999 au 31.12.2002 est de 788 MEURO.

Récemment, le Programme Fusion européen a fait l'objet d'une nouvelle évaluation. En tant que tel le Programme Fusion européen a été reconnu comme sans doute le meilleur exemple de valeur ajoutée européenne dans un programme de RD&D de la Communauté. Il a aidé à placer la science, la technologie et l'industrie européenne à la pointe des développements dans ce domaine. C'est pourquoi, il est recommandé de maintenir, voire même d'augmenter, l'effort européen dans ce domaine de recherche afin de permettre à l'Europe de conserver sa place de *leader* mondial de la fusion. Durant ces 5 dernières années, le Programme Fusion a obtenu d'excellents résultats confirmant que la fusion pouvait être considérée comme une option crédible dans la recherche de systèmes propres de production d'énergie électri-

que à grande échelle. Le rapport a aussi confirmé l'orientation de recherche énergétique de la fusion et a approuvé l'option d'une machine de type **ITER**. Il a recommandé que l'Europe étudie une alternative européenne à **ITER** dans les 2 prochaines années à cause des incertitudes inhérentes à toute négociation internationale. Ce rapport souligne aussi le fait qu'il y a encore un nombre important de questions scientifiques, technologiques et d'ingénieries à résoudre avant qu'une centrale électrique commerciale puisse être réalisée.

Le Programme Fusion a contribué au développement d'une communauté scientifique, technologique et industrielle forte et compétente qui est aujourd'hui en mesure de fournir tout le support nécessaire à l'avancement du Programme.

Depuis 1999, à part les travaux scientifiques réalisés au sein des Associations et soutenus par les Contrats d'Association entre les organisations nationales et Euratom, la majeure partie des recherches en fusion en Europe se déroule dans le cadre de l'EFDA (*European Fusion Development Agreement*) qui, au sein du 5^e PCRDT combine les activités technologiques dans les Associations et dans l'industrie européenne, l'utilisation de l'installation **JET** dans sa nouvelle forme juridique (depuis le 1^{er} janvier 2000) et supporte les contributions européennes aux collaborations internationales, telles que **ITER-FEAT**. Au sein des structures administratives de l'UE, le Programme Fusion s'est encore un peu plus affaibli. Très prochainement, celui-ci sera fondu au sein d'une grande entité Énergie. Dans le 4^e PCRDT, la fusion avait son programme clairement défini et bénéficiait d'une bonne visibilité. Puis, il fut pleinement intégré au 5^e PCRDT, mais relégué à un niveau sans grande visibilité sous le thème Préservation de l'écosystème où l'une des 22 actions-clés est consacrée à la fusion.

Le 16 novembre 2000, la recherche en fusion a reçu une impulsion politique positive lors du Conseil des ministres de la recherche de l'UE. En effet celui-ci a réaffirmé l'engagement européen à construire **ITER**, une installation considérée comme une étape vitale pour la production d'énergie de fusion. De plus, il a approuvé les directives de négociations pour la Commission portant sur la création d'un cadre international permettant aux parties du projet **ITER** et aux pays tiers habilités de se préparer conjointement pour l'instauration d'une entité juridique **ITER** et pour la construction d'**ITER** au moment opportun. Puis, le 19 janvier 2001, les ministres européens de la recherche ont approuvé la participation de l'Europe à **ITER** ainsi que la possibilité d'un site européen.

Le **JET** est, depuis le 1^{er} janvier 2000, propriété du UKAEA (Association hôte) tout en restant accessible aux autres Associations, qui l'ont financé jusqu'à fin 1999. Pour le **JET**, dans ses nouvelles structures définies par l'EFDA, il n'aura fallu que cinq mois pour lancer la première campagne de mesures. D'excellentes performances ont été obtenues et le **JET** a atteint, pour bon nombre de paramètres, qui ne dépendent pas de la taille de l'installation, les valeurs

caractéristiques attendues avec **ITER-FEAT**. Le **JET** constitue une installation remarquable pour préparer **ITER-FEAT**. C'est un succès qui va bien au-delà de l'EFDA, car au niveau international, japonais et américains attendaient avec impatience de voir si les structures mises en place étaient efficaces (opérateur UKAEA, avec personnel clé provenant de différentes associations). Et cela fonctionne bien. Le programme scientifique du **JET** est pleinement intégré dans les activités de fusion des Associations et dans les activités européennes d'**ITER**. Avec la nouvelle gestion du **JET**, les responsabilités techniques et scientifiques sont distribuées au sein des As-

sociations qui sont devenues les principaux acteurs du programme du **JET**. Sous l'accord EFDA, les équipes impliquées dans les opérations technique et scientifique du **JET** incluent des participants (~200 physiciens) de 23 laboratoires européennes (dont le CRPP/EPFL) et l'exploitation à distance est même devenue possible. Un logiciel "*Remote Data Access*" a été développé ces dernières années et est maintenant installé dans la plupart des Associations. Il permet au personnel de celles-ci l'accès direct aux données du **JET** avec leur propre paquet de traitement de données. Le succès du **JET** est tel que des modifications de ses performances sont en cours.

Activités suisses

L'année 2000 a été extrêmement profitable du point de vue scientifique pour l'Association Euratom - Confédération suisse. Sur le plan national, les travaux de recherche de l'Association ont donné de nombreux résultats qui ont fortement intéressé la communauté internationale. Du point de vue collaboration européenne, l'Association a activement participé à l'exploitation scientifique du **JET** aux côtés des autres associations européennes.

Les recherches effectuées par l'Association sont menées principalement par le Centre de Recherches en Physique des Plasmas de l'EPL-Lausanne (CRPP/EPFL). Les travaux du CRPP sont concentrés sur deux sites, celui de l'EPFL pour la physique des plasmas et celui de l'Institut Paul Scherrer (PSI) pour la technologie de la fusion. Ils ont bénéficié du support de l'EPFL, du PSI, du Fonds National Suisse pour la Recherche Scientifique (FNS) et d'Euratom.

Dans le domaine de la **physique du tokamak**, des résultats importants, qui ont eu un fort écho international, ont été obtenus sur le **tokamak TCV** (*Tokamak à Configuration Variable*) du CRPP. Pour la campagne scientifique de 2000, nous avons bénéficié de 3 MW de chauffage cyclotron électronique à 82.7 GHz et de 0.5 MW à 118 GHz. Ce système de chauffage a permis d'obtenir d'importants résultats expérimentaux dans le domaine du chauffage des électrons (élévation de la température électronique), de la physique de l'absorption des ondes cyclotron électroniques, de la génération du courant toroïdal par les ondes cyclotron électroniques. D'autre part, un *gyrotron* opérant à 118 GHz a délivré environ 350 kW durant 110 secondes, ce qui constitue un **record mondial** en ce qui concerne l'énergie délivrée par un *gyrotron* à haute fréquence.

Les activités dans le **domaine de la théorie et de la simulation numérique** se sont développées dans deux directions: l'interprétation des résultats obtenus par les expériences au CRPP et par celles des autres Associations, et des travaux de développement et d'exploitation physique de nouveaux codes. Il est important de noter que beaucoup de ces travaux n'ont été rendus possibles que grâce à la disponibilité des

ordinateurs massivement parallèles de l'EPFL et de la machine Cray T-3-E allemande, à travers une collaboration avec l'Association IPP-Garching (D). Ces travaux ont porté sur les domaines d'excellence du groupe, comme la stabilité en MHD (magnétohydrodynamique), la physique de l'interaction des particules rapides avec les ondes d'Alfvén des instabilités des modes liés à l'existence de gradient de température ionique dans les **tokamaks**.

Une fraction des activités de **physique du CRPP** est liée directement au projet de réacteur expérimental international (**ITER**) et avec l'exploitation scientifique du **tokamak** européen **JET**. Dans le cadre du projet **ITER**, l'Association a travaillé sur des sujets de physique demandés par **ITER**, en particulier les questions liées au contrôle du plasma et au dessin d'une antenne permettant d'injecter de manière contrôlée les ondes cyclotron-électroniques. Dans le cadre de l'exploitation scientifique du **JET** durant l'année 2000, l'un des membres du CRPP était responsable d'une "*Task Force*" spécialisée dans les phénomènes de MHD. Le CRPP a également détaché plusieurs de ses membres dans le cadre des *Task Forces* MHD et Plasma du *board*. Un autre membre du CRPP est détaché en permanence à l'unité de direction du **JET**.

Dans le domaine des **supraconducteurs**, l'Association a un rôle crucial dans le développement et le test de câbles supraconducteurs pour le projet **ITER**. L'installation d'essai de supraconducteurs (SC) SULTAN est et restera unique au monde pour le développement et la qualification des câbles SC. Une nouvelle configuration de câbles SC a été développée et testée avec succès par le CRPP. Dans cette configuration, le cuivre nécessaire pour la stabilité est mis sous forme de brins séparés (et non inclus dans le brin supraconducteur) et conduit à une importante réduction du coût de fabrication. Une conférence a été organisée par le CRPP avec une participation internationale (Europe - Russie - Chine - Japon) pour discuter des résultats obtenus et de leurs implications du point de vue programmatique.

Dans le domaine des matériaux à faible activation pour un réacteur de fusion, le CRPP poursuit ses travaux selon deux axes: l'étude des propriétés mécaniques des matériaux à basse activation déjà à disposition, comme l'acier ferritique martensitique "F82H" avant et après irradiation, et une investigation de la physique des dégâts d'irradiation dans des matériaux modèle et par simulation numérique. Notons que dans ce dernier volet une publication dans la célèbre revue *Nature* a été faite durant l'année 2000. Dans le domaine des aciers, une comparaison des défauts créés par une irradiation avec des protons dans l'installation PIREX et par celle avec des neutrons a permis d'identifier la nature de ces défauts et de montrer que ces derniers ne dépendaient pas du type d'irradiation. Un tel résultat est extrêmement important, car, en l'absence d'une source de neutrons de 14 MeV, nous devons simuler l'effet de ces derniers par d'autres types d'irradiation : des résultats physiques indépendants du type d'irradiation sont alors d'une importance cruciale pour le domaine, en attendant une décision de construire l'installation d'irradiation spécifique IFMIF (*International Fusion Material Irradiation Facility*).

Il est à souligner que les groupes supraconducteur et matériaux (26 personnes) localisés à au PSI, mais administrativement liés au CRPP, sont aussi soutenus financièrement par le PSI qui prend en charge certains frais liés aux infrastructures – notamment SULTAN et PIREX – utilisées par ces deux groupes.

Buts et résultats du projet financé par l'OFEN

La participation de l'OFEN, très limitée pour les activités de fusion, s'est concentré en 2000 sur les recherches du groupe du professeur Oelhafen (Université de Bâle) sur le conditionnement des parois de réacteur de fusion.

Surface Studies related to Fusion Reactor Material (Phase II : Reactivity and Properties of Materials, Université de Bâle) Avec ce projet (phase II : *reactivity and properties of materials*) le groupe du Professeur Oelhafen, de l'Université de Bâle poursuit ses activités sur le conditionnement des parois internes de la chambre de confinement d'un réacteur de fusion. C'est un aspect important des futurs réacteurs de fusion puisque l'on veut que l'interaction entre la première paroi et le plasma n'entraîne aucune contamination de ce dernier.

En 2000, les recherches se sont concentrées sur les matériaux composites carbone-alcalin, leur réactivité et leur érosion par des ions oxygène et la formation de carbures de silicium et de molybdène. L'analyse de la boronisation (déposition de fines couches de bore) de substrats tests, qui avaient été placés dans la chambre à vide du TCV pendant son conditionnement, est venue compléter ce travail. D'autres analyses ont été réalisées sur des tuiles en graphite du

Au niveau international, le programme scientifique de l'Association est pleinement intégré à celui de l'Union Européenne. À travers le contrat d'Association, l'EFDA et les accords y relatifs, tel l'Accord sur la mobilité, le CRPP a bénéficié de multiples collaborations avec des partenaires européens, mais aussi américains, russes et japonais et a participé à divers travaux communautaires. Les collaborations ont porté sur tous les domaines d'activités du CRPP. Plusieurs membres du CRPP participent "*ad personam*" à des tâches d'expert et de coordination dans le cadre européen. Les Accords d'exécution (*Implementing Agreements*) de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) ont également été utilisés, en particulier celui sur les matériaux à basse activation pour un réacteur à fusion.

Quelques actions en vue d'améliorer la **perception de la fusion par le public**: un grand effort dans le domaine de l'amélioration de la perception par le public a été réalisé tant sur le plan européen que sur le plan national. À part des interventions dans les médias (journaux, radio, télévision), une journée "Fusion" a été organisée le 20 juin à l'EPFL (<http://crppwww.epfl.ch/journee/>). Elle a rassemblé une audience internationale qui a bénéficié de contributions sur la politique de recherche et sur divers thèmes scientifiques présentés par des personnalités européennes, ainsi que sur des questions liées aux réacteurs de fusion.

TCV. Ces analyses permettent de comprendre les phénomènes de contamination de la première paroi des réacteurs. Concernant les études de l'interaction de film composite carbone-lithium avec des ions oxygène énergétiques (entre 200 eV et 5 keV), une attention particulière a été portée sur l'érosion. L'interaction chimique pure domine avec des ions de faibles énergie conduisant à des changements bien connus dans la composition et la formation d'une couche d'oxyde riche en lithium à la surface. Pour des ions d'énergie supérieure à 2 keV, l'érosion physique devient importante et les liaisons chimiques entre les trois composants, oxygène, lithium et carbone sont modifiées. Pour réaliser ses analyses, le groupe de Bâle utilise la spectroscopie photoélectronique en régime UV et X.

Comme les matériaux à Z élevé ont un intérêt pour les applications futures, des études préliminaires ont été réalisées sur l'interaction d'atomes de carbone thermiques avec des surfaces de silicium et de molybdène. Ces expériences concernent la formation de couches de carbure en fonction de la température et peuvent servir de base pour des expériences comparables à celles des systèmes alcalin-carbone.

Perspectives pour 2001

Le projet mentionné est poursuivi. L'analyse des échantillons de TCV reprendra avec une recherche

sur la composition de surface des tuiles graphites prélevées dans la chambre à vide.

Liste des projets

1. M. Töwe, P. Reinke et P. Oelhafen, Institut für Physik / *Uni-Basel* : Surface Studies related to Fusion Reactor Material (Phase II : Reactivity and Properties of Materials) / rapport annuel disponible.

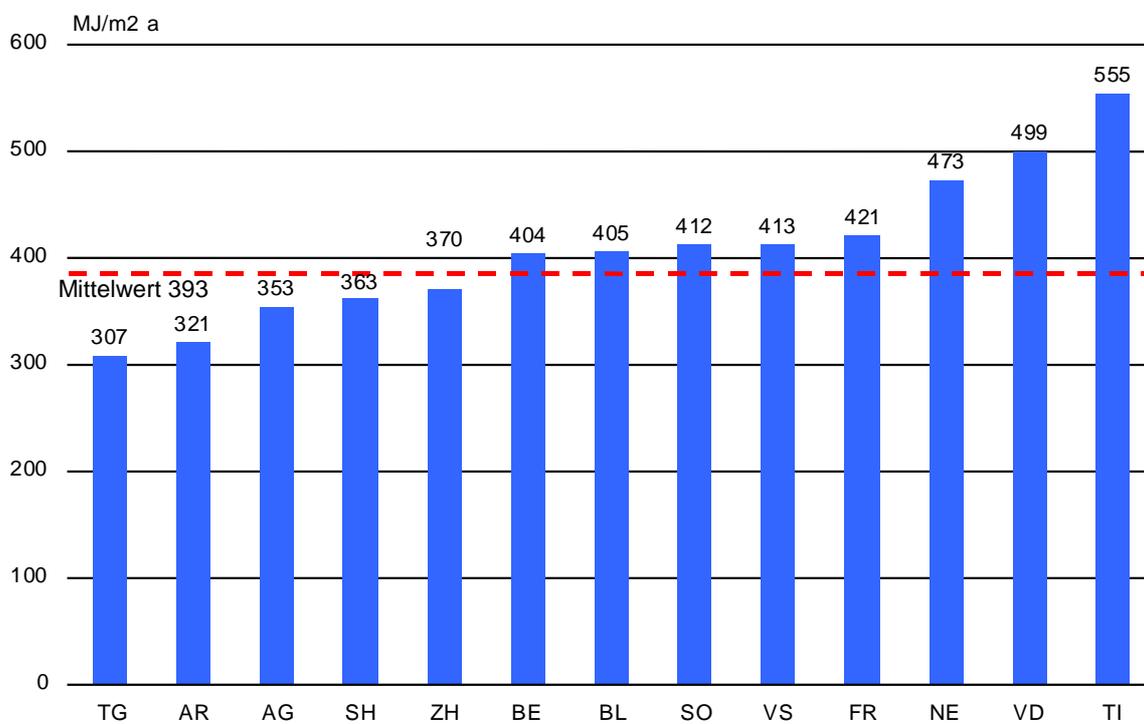
Quelques sites internet sur la fusion

- Site du CRPP : <http://crppwww.epfl.ch/crppfusion> ; <http://crppwww.epfl.ch/crppabout>
- Site de l'Université de Bâle: <http://monet.unibas.ch/oelhafen/>
- Site du **JET** : <http://www.jet.org>
- Site du projet **ITER** : <http://www.iter.org>
- Site de la Commission européenne DG Recherche : <http://europa.eu.int/comm/research/fusion1.html>

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 2000

Ruedi Meier
ruedimeier@bluewin.ch



Energiekennzahlen für Wärme

Der Wärmebezug für Raumheizung und Warmwasser ist in über 20'000 Haushaltungen in 13 Kantonen ermittelt worden. In der West- und Südschweiz sind die werte am grössten.

Schwerpunkte

Das Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen (EWG) des Bundesamts für Energie (BFE), das sich schwer gewichtig mit Fragen der Energiewirtschaft und der Energiepolitik befasst, hat im Jahr 2000 wichtige Abklärungen im Bereich Energieperspektiven sowie Energiemassnahmen vorgenommen. Die Resultate werden primär zur Beantwortung von politischen Vorstössen, zur Ausarbeitung von Botschaften des Bundesrats sowie für die Weiterentwicklung der Energiepolitik verwendet.

Ebenfalls profitieren die Kantone und verschiedene Organisationen von den Forschungsergebnissen.

Anfangs Jahr ist das Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen der eidgenössischen Energieforschungskommission (CORE) mit einem positivem Echo vorgestellt worden. In zahlreichen Fachpublikationen und Medienberichten sind die Ergebnisse des Forschungsprogramms Energiewirtschaftliche Grundlagen verbreitet worden [31].

Anvisierte Ziele 2000

Gemäss EWG-Schwerpunktprogramm aus dem Jahre 1995 ist es das Ziel des Forschungsprogramms Energiewirtschaftliche Grundlagen, politische Entscheidungsgrundlagen für die Energiepolitik zu erarbeiten. Dabei ist zu beachten, dass die Energiemärkte in verschiedener Hinsicht unvollkommen sind und einer speziellen Betrachtung bedürfen. So sind externe Effekte in einem hohen Ausmass zu verzeichnen. Auch bei einer Liberalisierung der leitungsgebundenen Energieträger ist weiterhin mit einem langen Investitionsvorlauf und Nutzungszeiten von Energieinvestitionen, wie beispielsweise im Gebäudebereich, zu rechnen. Die Entwicklung der fossilen Energiepreise im Jahr 2000 zeigt, dass der wirtschaftliche Einfluss der Energiemärkte nach wie vor bedeutend ist und die Weltkonjunkturlage eine hohe Anfälligkeit auf Preisschwankungen aufweist. Zudem ist mit ernsthaften Versorgungsproblemen zu

rechnen, wenn eine Konzentration der Energiebezüge auf politisch wenig stabile Länder, das heisst auf den Erdöleinkauf im Nahen Osten, stattfindet. Für eine funktionierende und weniger konjunkturanfällige Wirtschaft ist der Versorgungssicherheit weiterhin grosses Gewicht beizumessen.

Mit der Ablehnung der Energievorlagen durch die Schweizerische Stimmbevölkerung am 24. September 2000 hat die Energieforschung in den kommenden Jahren von den bestehenden gesetzlichen Grundlagen wie Eidgenössisches Energiegesetz, CO₂-Gesetz, Elektrizitätsmarktgesetz (EMG) und Umweltgesetz auszugehen. In diesem Sinn ist die Überarbeitung der bestehenden Projektliste des Forschungsprogramms Energiewirtschaftliche Grundlagen an die Hand genommen worden. Diese kann auf dem Internet abgerufen oder bei der Programmleitung bestellt werden (ruedimeier@bluewin.ch).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

DATEN

Die **“Erhebung der durchschnittlichen Energiekennzahlen für Neubauten in 13 Kantonen”** [1] konnte erfolgreich abgeschlossen werden: Mit einer schriftlichen Umfrage in über 20'000 Haushaltungen und Unternehmen mittels Fragebogen ist die effektive mittlere Energiekennzahl für Wärme (Raumheizung und Warmwasser) in 13 Kantonen erhoben worden. Dabei hat sich eine mittlere Energiekennzahl Wärme von 393 MJ/m² a ergeben. Unter den 13 untersuchten Kantonen bestehen zum Teil grosse Unterschiede (vgl. Titelblatt). Es liegt eine Spannweite von 307 bis 555 MJ/m² a vor, wobei 8 Kantone sich innerhalb einer Abweichung von Plus/Minus 10 % bewegen. Es zeigte sich, dass der Faktor “Kanton” über das gesamte Sample einen signifikanten Einfluss auf die Höhe der Energiekennzahl hat. Die Unterschiede zwischen den Kantonen sind vor allem für die Extrempositionen, das heisst die Kantone Tessin,

Waadt und Thurgau signifikant. Die Rangreihenfolge im Mittelfeld ist zufällig. Beim Vergleich zwischen den Kantonen zeigt sich ein Gefälle zwischen der Ost- und der West-/Südschweiz. Die Kantone Thurgau, Appenzell Ausserrhodon und Aargau weisen die tiefsten, Neuenburg, Waadt und Tessin die höchsten Energiekennzahlen auf.

ENERGIEPERSPEKTIVEN

Die erarbeiteten **Energieperspektiven** [2-6] stellen eine wichtige Grundlage für die Beurteilung von Massnahmen – z.B. im Rahmen von *EnergieSchweiz* – dar. Im Jahr 2000 sind *ex-post*-Analysen für die Jahre 2000/1999/1998 sowie 1999/1990 durchgeführt worden. Gleichzeitig sind Einflussfaktoren wie Klima, Energiebezugsflächen, Energiepreise, politische Massnahmen etc. untersucht worden. Die Analyse der energetischen und klimatischen

Auswirkungen einer Förderabgabe bzw. einer Abgabe gemäss Grundnorm stellten einen Schwerpunkt der Arbeiten dar.

Insgesamt konnte von 1990 bis 1999 eine Energieverbrauchs Zunahme von 88 PJ oder 11% festgestellt werden. Dabei haben die fossilen Energieträger (+52 PJ / 9%) zugunsten der erneuerbaren Energie-

träger und der Industrieabfälle leicht unterdurchschnittlich zugenommen. Der Elektrizitätsverbrauch hat sich etwa wie der Durchschnitt entwickelt. Eine Übersicht über den Einfluss von einzelnen Effekten auf den Energieverbrauch für alle Verbrauchsbereiche ist in nachstehender Tabelle dargestellt.

Endenergieverbrauch insgesamt 1990 bis 1999 und 2000 (Quelle: Prognos)

	1990	1998	1999	2000 Prognose	Veränderung 1990/1999		Veränderung 1990/2000	
					PJ	%	PJ	%
Nach Energieträgern								
Erdölprodukte	501.0	518.6	523.8	530.1	22.8	4.5	29.0	5.8
Heizöl extra leicht	223.0	227.1	221.2	219.8	-1.9	-0.8	-3.2	-1.4
Heizöl MS	18.9	10.4	8.6	8.1	-10.3	-54.6	-10.7	-57.0
Benzin	157.3	163.7	169.1	171.5	11.8	7.5	14.2	9.0
Diesel	47.8	49.5	52.5	53.8	4.7	9.8	6.0	12.4
Flugtreibstoffe	48.1	61.3	65.2	69.8	17.2	35.7	21.7	45.2
Übrige	5.9	6.6	7.2	7.1	1.3	21.8	1.2	19.9
Erdgas	63.4	91.4	94.9	96.8	31.5	49.7	33.4	52.6
Elektrizität	167.7	178.6	184.4	187.8	16.7	10.0	20.1	12.0
Fernwärme	10.4	13.3	13.3	13.4	2.9	27.5	3.0	28.7
Holz	17.1	20.9	20.6	20.8	3.5	20.5	3.7	21.9
Kohle	14.4	3.8	4.0	3.8	-10.4	-72.3	-10.6	-73.7
Müll, Industrieabfälle	8.7	14.8	14.5	15.0	5.9	67.4	6.3	72.5
Übrige Erneuerbare Energien	3.4	5.7	6.3	6.5	2.8	82.3	3.1	90.1
Insgesamt	786.1	847.1	861.7	874.1	75.5	9.6	88.0	11.2
Davon fossile Energieträger	578.8	613.7	622.6	630.6	43.8	7.6	51.8	8.9

Im Rahmen der **“Perspektiven des Energieverbrauchs in Dienstleistungsbetrieben und Landwirtschaft”** wurden u.a. die Auswirkungen von verschärften Massnahmen bei Bürogebäuden für das Jahr 2020 geschätzt: Es wird ein technisches Elektrizitätspotential von 1000 TJ/a oder 45% berechnet.

Im Rahmen der **“Perspektiven des Energieverbrauchs des Verkehrs”** der Firma Infras ist neben den *ex-post*-Analysen der Modellteil Schienenverkehr aktualisiert worden.

MODELLE

Im Bericht **"Szenarien zu den Volksinitiativen "Strom ohne Atom" und "Moratorium Plus"** [7] wird untersucht, welche Auswirkungen bei einer Annahme der Volksinitiative "Strom ohne Atom" in energetischer und wirtschaftlicher Hinsicht zu erwarten sind. Unter anderem geht es um die Frage, wie allfällige Stromversorgungslücken bei einer vorzeitigen Stilllegung von Kernkraftwerken geschlossen werden können und mit welchen Strategien nachfrage- und angebotseitig reagiert werden könnte. Neben den energetischen Auswirkungen werden auch CO₂- sowie NO_x-Bilanzen erstellt. Weiter geht die Studie allfälligen Mehr- und Minderkosten bei einer

vorzeitigen Stilllegung der Kernkraftwerken nach, die mit einer Schliessung der Stromlücken verbunden sind. Ebenfalls wird analysiert, wie zusätzliche CO₂-Emissionen, die mit den Wärme-Kraft-Kopplung-Strategien verbunden sein können, durch weitergehende Energiesparmassnahmen kompensiert werden könnten. Die Auswirkungen unsicherer und umstrittener Annahmen (z.B. Energiepreise, technischer Fortschritt, Wirtschaftswachstum) werden mittels Sensitivitätsrechnungen unter die Lupe genommen.

Die Firma Ecoplan hat den **“Ausstieg aus der Kernenergie”** [8] und die wirtschaftlichen Auswirkungen mit einem Gleichgewichtsmodell untersucht. Dabei sind insgesamt 20 Stromproduktionstechnologien berücksichtigt worden. Es konnten modellmässig verschiedene Aspekte wie mögliche Strompreiserhöhungen, Stromüberschüsse in Europa, Stromsparpotentiale oder der Verlust an produktiven Elektrizitätsproduktionspotentialen erfasst werden. Ebenfalls wurde auf geringere Entsorgungskosten für radioaktive Abfälle, tiefe Ertüchtigungskosten für Kernkraftwerke, dynamische Markt- und Aussenhandelseffekte eingegangen. Die wirtschaftlichen Auswirkungen sind u.a. mit folgenden Kenngrössen erfasst worden: Brutto-Inland-Produkt, Wohlfahrt und Wert-

schöpfung; Beschäftigung; Investitionen; Energieverbrauch; CO₂-Emissionen; Landesindex der Konsumentenpreise; Umsätze in den einzelnen Branchen; aussenwirtschaftliche Position der Schweiz und soziale Verteilungswirkungen.

KOSTEN UND WIRTSCHAFTLICHKEIT VON ENERGIESYSTEMEN

Das Projekt **“Marginale Zahlungsbereitschaft für eine erhöhte Internalisierung des Risikos von Kernkraftwerken”** [9] wird am Sozioökonomischen Institut der Universität Zürich durchgeführt. Mit einer *Conjoint-Analyse* soll die marginale Zahlungsbereitschaft eines Teils der Bevölkerung für eine erhöhte finanzielle Deckung der Folgen von Unfällen in Kernkraftwerken geschätzt werden.

Das Projekt **“Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen”** [10] vom PSI/CEPE will allfällige Mehrkosten bei zusätzlichen Energiemassnahmen im Gebäudebereich abklären. Bisher sind Literaturrecherchen und Analysen zur Datenlage vorgenommen worden. Ebenfalls sind erfolgversprechende Methoden abgeklärt worden, um die Grenzkosten bei forcierten Energiemassnahmen analysieren zu können. Die Grenzkostenkurven sollen *ex-post* sowie *ex-ante* für Neubauten wie auch Sanierungen bestimmt werden.

Die Studie **“Neu Bauen statt Sanieren”** [11] der Arbeitsgemeinschaft Econcept AG, Zürich, und des Instituts für Energie der Fachhochschule beider Basel will die Wünschbarkeit, die Hemmnisse und mögliche Massnahmen zur Unterstützung einer Ersatzneubaustategie im Vergleich mit Gesamtanierungen prüfen. Die Auswirkungen beider Strategien sind zu untersuchen und Ziele und Kriterien für eine Ersatzneubaustategie sind herzuleiten. Ebenfalls werden Massnahmen analysiert, welche eine sinnvolle Ersatzneubaustategie statt Sanierungen unterstützen können. Neben energetischen und ökologischen Kriterien werden insbesondere die Hemmnisse / Chancen aus sozialer, städtebaulich planerischer und wirtschaftlicher Sicht untersucht und bei der Beurteilung der Wünschbarkeit bzw. Machbarkeit der Ersatzneubaustategie berücksichtigt.

Die Studie **“Akzeptanz von Komfortlüftungen im Wohnungsbereich”** [12] des Bureau d'Études Keller-Burnier, Lavigny, und der Marketingfirma Ipsos, Dübendorf, greift ein kontroverses Thema auf. Bisherige Studien sind untersucht und eine qualitative Umfrage bei 19 Fachpersonen aus dem Baubereich ist vorgenommen worden. Generell wurde ein geringer Kenntnisstand über Komfortlüftung sichtbar. Diverse Vor- aber auch Nachteile der Komfortlüftung wurden aufgelistet. In Zusammenarbeit mit der Begleitgruppe ist für die weitere Projektphase ein Fragebogen erarbeitet worden, der bei Fachleuten und der Immobilienwirtschaft eingesetzt werden soll.

Die **“Wirkungsanalyse kantonaler Förderprogramme nach Artikel 15 Energiegesetz (ENG)”** [13] der Firmen Infras und TNC Consulting wird Wege aufzeigen, wie die Globalbeiträge des Bundes für Fördermassnahmen an die Kantone wirksam eingesetzt werden können, und wie die Berichterstattung der Kantone an den Bund optimal gestaltet wird. Es sollen Instrumente für die Umsetzung (elektronische Erfassungsraster und Datenbank) entwickelt und in ausgewählten Kantonen getestet werden.

MASSNAHMEN

Im Projekt **“Facility Management (FM) und Energieeffizienz”** [14] der Arbeitsgemeinschaft Gruenberg & Partner, Herzog, Kull Group und pom+Consulting wird deutlich, dass das Facility Management auch in der Schweiz eine grössere Bedeutung erhalten wird. Dabei besteht ein erheblicher Handlungsspielraum für effizientere Energie-Investitionen und -nutzungen, die in der Zukunft besser ausgeschöpft werden sollten. Im Rahmen des Projekts ist bei 200 Schweizer Firmen eine Umfrage für eine Marktanalyse vorgenommen worden. Mit 20 ausgewählten Betrieben wurden vertiefende Interviews geführt, um Antworten auf die Frage der Integration des Facility- und Energiemanagements in die Unternehmensorganisation und Prozessarchitektur zu erhalten. Bei 5 ausgewählten Firmen wurde das Optimierungspotential bezüglich Facility- und Energiemanagement identifiziert und diskutiert. Die wichtigsten Ergebnisse der Studie sind in zehn Thesen zusammengefasst worden. Unter anderem wird festgehalten, dass in der Schweiz das Verständnis für ein ganzheitliches *Facility-Management* als Führungsprozess vorhanden sei. Die Umsetzung wäre aber wegen fehlender Unterstützung seitens der Geschäftsleitung schwierig. In der Regel fehlen konkrete Strategien. Weiter wird ein grosses Bedürfnis nach standardisierten Kennzahlen und einem funktionierenden Benchmarking festgestellt. Für Klein- und Mittelbetriebe wird aufgrund von Kosten- und Nutzen-Überlegungen nur ein partielles *Facility-* und Energiemanagement empfohlen. Zudem müssten einfache Informationstools bereitgestellt werden, um eine rasche Zugänglichkeit zu Vergleichsdaten sicherzustellen. Die Erfolge des *Facility-Managements* würden primär aufgrund schnell messbarer monetärer Werte beurteilt. Zusätzliche Nutzenaspekte (z.B. Produktivität am Arbeitsplatz, Vermietbarkeit) seien hingegen nicht entscheidend. Mögliche Energieeinsparungen müssten nicht nur über Leitbilder, sondern auch über eine Delegation der Kostenverantwortung auf einzelne Geschäftseinheiten und das Energiebewusstseins jedes Mitarbeiters gefördert werden. Damit das Facility- und Energiemanagement noch griffiger ausgestaltet werden kann, müsste u.a. eine Wissensplattform geschaffen werden, Kennzahlstandards, *Benchmarks* sowie Pflichtenhefte erarbeitet und zur Verfügung gestellt werden.

Mit dem Projekt **“Effizienzmassnahmen im Strombereich”** [15] der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz (S.A.F.E.) soll die Wirksamkeit der Instrumente und Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bei Elektrogeräten geklärt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die Akteure und der entsprechende Markt analysiert, die bisherigen Programme zur Effizienzsteigerung bei Elektrogeräten auf kantonaler und eidgenössischer Ebene analysiert und die Entwicklung des Verbrauchs bei Elektrogeräten von 1980 bis 2000 untersucht. In den weiteren Arbeitsschritten sollen konkrete Instrumente und Massnahmen sowie der Handlungsbedarf für die Steigerung der Energieeffizienz bei Elektrogeräten in den kommenden 10 Jahren dargelegt werden. In der gebildeten Arbeitsgruppe beteiligt sich der Fachverband Elektrogeräte und Anlagen (WEA) mit den durch sie vertretenen Industrieunternehmungen leider nicht.

Das Projekt **“Verminderung des Treibstoffverbrauchs: Instrumentenevaluation”** [16] (Bearbeitung: Infrac/Metron) hat verschiedene Modelle, Verbrauchsvorschriften, Bonus-Malus-Modelle, und handelbare Zertifikate untersucht. Es zeigt sich dabei, dass ein Vorschriftenmodell machbar ist, jedoch mit Einbussen bezüglich Effizienz und eines Risikos, dass Ungerechtigkeiten zwischen den Marktteilnehmern oder bedeutende private Kosten entstehen. Beim Bonus-Malus-System werden eine unklare Zielerreichung sowie fehlende gesetzliche Grundlagen festgestellt. Ein Zertifikatsmodell wäre neu. Mit einem Zertifikatshandel könnte aber die Effizienz wesentlich gesteigert werden. Als ein Resultat der Studie wird ein Zertifikatsmodell als ideales Instrument für die Absenkung des Treibstoffverbrauchs vorgeschlagen.

Die Studie **“Nachhaltige Elektrizitätsversorgung”** [17] ist vom Coseil des Académies Scientifiques Suisses (CASS) mit Vertretern aus allen Akademien zu Ende geführt worden. U.a. wurde dabei eine Definition der Nachhaltigkeit vorgenommen (dokumentiert im NZZ-Artikel von Ruh-Zuberbühler, 6.1.1999), die eine Güterabwägung zwischen wirtschaftlichen, sozialen und ökonomischen Aspekten vorschlägt, wenn aber das Überleben der Menschheit tangiert werde, der ökologische Aspekt Priorität haben müsse. Die eigentliche Untersuchung der Nachhaltigkeit der Elektrizitätsversorgung wurde mit einem Computermodell vorgenommen, das aber quantitativ unbefriedigende Aussagen generierte. Die notwendige Gedankenarbeit zur Diskussion der Zusammenhänge wird aber als sehr lehrreich bezeichnet. In einem weiteren Artikel wird ein Konsens über die wichtigsten Tatsachen und Einflüsse der Stromversorgung dokumentiert (Begehrter, Ritz, Ruh; NZZ, 8.8.2000).

Mit dem Projekt **“Förderung des Exports im Energiebereich”** [18] der Arbeitsgemeinschaft INFRAS und Fhg-ISI sollen die Exportchancen von Schweizer Herstellern im Bereich energieeffizienter Technolo-

gien und erneuerbarer Energien untersucht werden. Mögliche Fördermassnahmen sind aufzuzeigen und zu bewerten und die daraus resultierenden ökonomischen und umweltrelevanten Auswirkungen für die Schweiz und das Ausland abzuschätzen. Das Projekt soll mit Empfehlungen für Massnahmen abgeschlossen werden, die aufgrund der relativen Wettbewerbsvorteile der Schweizer Wirtschaft und der naheliegenden Zielländer prioritär ergriffen werden sollten. Die bisherigen Analysen aufgrund von Auswertungen der Statistiken der Oberzolldirektion und Interviews bei rund 20 Akteuren von Energieeffizienzbranchen zeigen, dass bei einer engen Abgrenzung energieeffizienter Güter und erneuerbaren Energieanlagen ein Exportwert von rund 600 MCHF (Mio. Schweizerfranken), ohne Berücksichtigung von Dienstleistungen, vorliegt. Die vertiefenden Gespräche ergaben für einzelne Produktgruppen, wie beispielsweise Isolationsmaterial für Wärmedämmung, jährliche Exportwerte von 20 MCHF, hocheffiziente Elektromotoren 120 MCHF, gewerbliche Wäschereimaschinen 15 MCHF, Wärmekraftkoppelungsanlagen 160 MCHF und Dienstleistungen im Bereich Haustechnik und Gebäudemanagement alleine rund 500 MCHF. Ebenfalls sind sehr interessante Schätzungen zum Exportvolumen der erneuerbaren Energie vorgenommen worden: Holzfeuerungen ca. 12 MCHF, Biogas Anlagen ca. 20-25 MCHF, Solar-systeme 14 MCHF, Wärmepumpen ca. 20 MCHF. Für die Schweizer Exporteure ist vor allem der westeuropäische Markt mit einem Inlandumsatz von 15 bis 20 Mia. EURO pro Jahr von grösstem Interesse. Markante Märkte kommen in Nordamerika und Asien dazu, die allerdings nur unter Inkaufnahme von grösseren Anstrengungen aus der Schweiz erschlossen werden können. In der folgenden Projektphase im Jahr 2001 sollen vor allem mögliche Förderinstrumente abgeklärt werden, um zu einer Exportförderstrategie für den Energiebereich zu gelangen.

Das Projekt **“Technologievermittlung im Energiebereich”** [19] der Firma Interface, will die Wirkungen, Stärken und Schwächen entsprechender Anstrengungen im Pilotprojekt Kanton Bern evaluieren und Empfehlungen für eine effiziente Technologievermittlung auf regionaler und nationaler Ebene formulieren.

Im Bericht **“Warendeklaration für Personenwagen”** [20] (Grütter Consulting) wird die Machbarkeit eines Labelling für Personenwagen untersucht.

In einem Projekt von der Firma CUB, wird der **“Energieverbrauch im öffentlichen Verkehr”** [21] untersucht. Im Rahmen von persönlichen Kontakten mit verschiedenen Exponenten von Transportunternehmungen sowie bundesintern mit Personen, die mit der Datenerhebung vertraut sind, soll der Energieverbrauch des öffentlichen Verkehrs in der Schweiz zusammengestellt und ausgewertet werden. In einem zweiten Schritt ist vorgesehen, spezifische Energieverbrauchsdaten für den öffentlichen Verkehr zu analysieren. Die bisherigen Erhebungen zeigen, dass für

einzelne ÖV-Betriebe grosse Schwankungen um den Mittelwert (355 kJ/Person, min. 298, max. 4'187) bestehen. Die Abgrenzung zwischen Traktionsenergie und stationärem Verbrauch ist bisher datenmässig nur unvollständig erhoben worden. Die Abgrenzung zwischen bahneigenen und bahnfremden Nutzern des ÖV-Systems bedarf weiterer Abklärungen. Mit der Bahnreform (Open Access) wird sich die Thematik weiter verschärfen. Ebenfalls bestehen Kenntnislücken bezüglich der Aufteilung des elektrischen Energieverbrauchs des Güter- bzw. Personenverkehrs. Immerhin lassen die verfügbaren Messungen mit dem Simulations-Tool (E-Trac) methodisch genügend genaue Analysen zu.

Bei der **“Elektrofahrzeugplattform an einer Schule (Legair)”** [22] handelt es sich um ein Projekt des Gymnasiums Köniz, Abteilung *Business-School*: Die Möglichkeiten der Nutzung von Solarenergie im Bereich von *Elektrobikes* sollen damit in breiten Kreisen bekanntgemacht werden: Während des Sommers 2000 sind im Zentrum von Bern vier Fahrzeuge ausgeliehen worden. Das Projekt hat ein recht grosses Medienecho erfahren und es wurde im Rahmen des *“Prix Eta”* mit dem ersten Preis ausgezeichnet.

INTERDEPENDENZEN

Das Projekt **“Abgeltungen bei Infrastrukturanlagen? Grossprojekte zwischen Widerstand und Akzeptanz”** [23] ist vom Wirtschaftswissenschaftlichen Zentrum der Universität Basel erarbeitet worden. Die Autoren gehen davon aus, dass die Realisierung von Grossprojekten die politischen Entscheidungsträger häufig vor grosse Herausforderungen stellt. Nicht selten sehen sie sich mit heftiger lokaler Opposition gegen Projekte aller Art konfrontiert (Flughafenausbau, nukleare Endlager oder Übertragungsleitungen). Es wird den Fragen nachgegangen, wodurch – bei einer grundsätzlichen Zustimmung zu einem Infrastrukturprojekt – der Widerstand ausgelöst wird. Weiter werden Verfahrensfragen, Projekttypisierungen, aber auch die Möglichkeit einer Umstimmung von potentiellen Gegnern eines Projekts nachgegangen. Insbesondere wird geklärt, inwiefern Abgeltungen einen Beitrag dazu leisten können. Als ein Ergebnis der Studie zeigt sich, dass lokaler Widerstand mit der ungleichen Verteilung von Nutzen und Kosten zusammenhängt. Abgeltungszahlungen stossen dabei auf unterschiedliche Reaktionen: Bei der Wasserkraft werden sie eher akzeptiert als in Bereichen, wo Projekte mit einem potentiell hohen Risiko verbunden sind (z.B. Nuklearanlagen). Die Interdependenz zwischen Markt und Moral in der Infrastrukturpolitik kann zudem erklären, weshalb Sachleistungen bei der Standortbevölkerung oft auf höhere Akzeptanz stossen als rein monetäre Abgeltungen. Eine Politik, die mit prozeduraler Fairness ein Vertrauenspotential zwischen den Nutzern und Anbietern aufbaut, verspricht einigen Erfolg: Ein institutioneller Dialog durch weitreichende Mitwirkungsrechte für die lokal betroffene Bevölkerung und die Gründung von Spe-

zialregionen für einzelne Infrastrukturprojekte werden deshalb vorgeschlagen. Die wichtigsten Ergebnisse der Studie werden einerseits in einem Entscheidungsbaum und andererseits durch prägnante Thesen präsentiert.

Im Projekt **“Nachhaltigkeit: Kriterien und Indikatoren für den Energiebereich”** [24], bearbeitet durch die Firmen Ecoplan sowie Factor Consulting, soll der Stellenwert der Energie im Rahmen des Nachhaltigkeitskonzepts aufgezeigt werden. Gleichzeitig ist ein griffiges, quantitatives System für Nachhaltigkeitsindikatoren für den Energiebereich konzeptionell zu entwickeln und für die Umsetzung vorzubereiten. In einem ersten Zwischenbericht werden Vorschläge für Kriterien in den Bereichen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft präsentiert. Ebenfalls werden theoretische und methodische Fragen geklärt. Die Arbeiten sind integriert in die laufenden Bemühungen der gesamten Bundesverwaltung, wie sie u.a. durch das Amt für Raumentwicklung, Bundesamt für Statistik, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft sowie der Direktion für Entwicklungszusammenarbeit im Gang sind.

In der Ergänzungs- und Zusatzstudie **“Conception d’une procédure d’aide à la décision en matière de politique énergétique basée sur des critères et des indicateurs de développement durable”** [25] der Universität Genf sollen verschiedene methodische Entscheidungshilfen zur Klärung des Nachhaltigkeitskonzeptes im Bereich Energie untersucht werden. Unter anderem werden analysiert:

- Methoden und statistische Umweltkonzepte
- Kosten-/Nutzenanalysen
- Entscheidungshilfen, wie sie H. Simon entwickelt hat
- Multikriterielle Entscheidungsanalysen

Mit den verschiedenen Methoden werden die Nachhaltigkeitskriterien im Bereich Energie getestet, wie sie im Rahmen des Modells Eurostat entwickelt worden sind.

MARKTORDNUNG

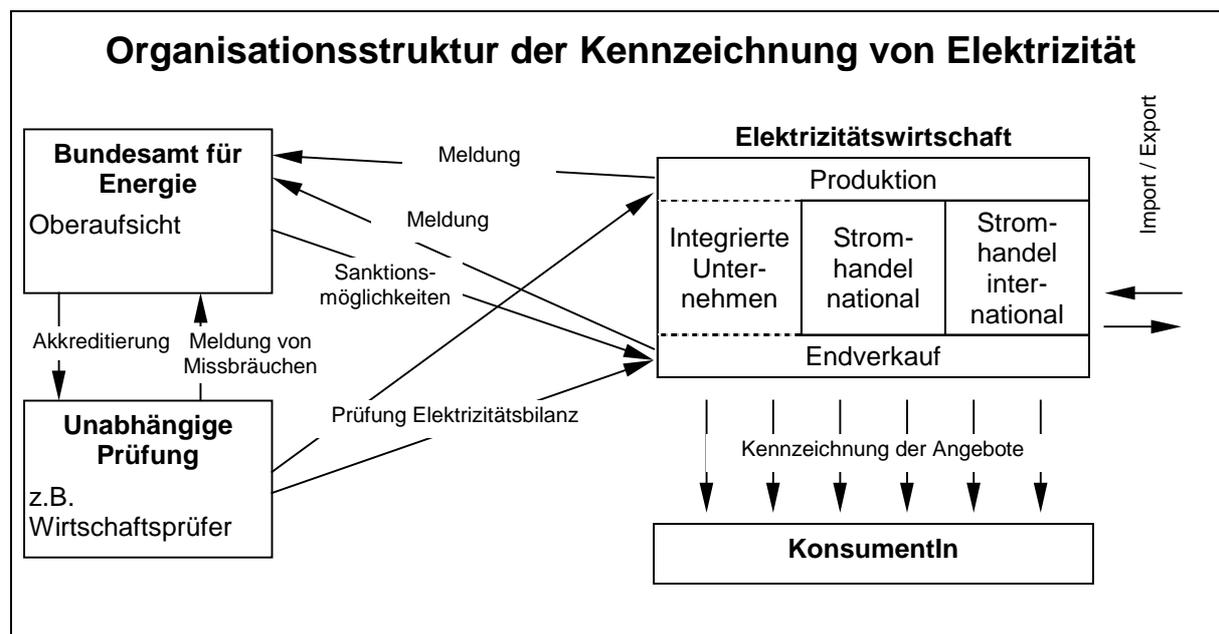
Das Projekt **“Verbesserung der Bedingungen der Wasserkraftwerke in der Schweiz”** [26] vom *Center for Energy Policy and Economics* (CEPE) will die relevanten Rahmenbedingungen mit ihren Auswirkungen auf die Energiemärkte und -preise im Bereich Wasserkraft beurteilen. Die wichtigsten Faktoren, welche die Wettbewerbsfähigkeit der Branche beeinträchtigen bzw. verbessern können, sollen identifiziert werden. In einem zweiten Schritt wird die Kostenstruktur der Wasserkraftproduktion und die Erlösseite untersucht. In einem dritten Schritt sind Massnahmen auf der politischen Ebene zu analysieren, welche die Produktionsbedingungen der Wasserkraftwerke verbessern können. Bisher sind Literaturstudien sowie Auswertungen der zu erwartenden Auswirkungen der Liberalisierung auf die

Wasserkraft vorgenommen worden. Die wichtigsten Faktoren sind identifiziert und eine Datenbank für ein *Benchmarking* der Kostensituation der Wasserkraftwerke in der Schweiz ist im Aufbau begriffen.

Das Projekt **“Marktöffnung im Gasbereich”** [27], bearbeitet durch die Firma Econcept, wird – ausgehend von den Grundzügen der EU-Richtlinie zur Gasmarktöffnung – mögliche Auswirkungen einer Liberalisierung des Gasmarktes auf die Energiewirtschaft, den Energieverbrauch, die Energiepreise, die Wahl der Energieträger, die Versorgungssicherheit und die Umwelt analysieren. Kompensierende Massnahmen sollen aufzeigen, wie allfällige negative Auswirkungen vermieden bzw. gelindert werden könnten. Bisher sind die Preisbildung für Erdgas ana-

lysiert und eine Auswertung der Erfahrungen mit der Gasmarktöffnung im Ausland vorgenommen worden. Im Rahmen von zwei Szenarien ist eine erste Analyse von Wirkungszusammenhängen in die Wege geleitet worden.

Die Studie **“Stromeinfuhr oder Gasverstromung im Inland”** [28] der Firma Prognos vergleicht die inländische Stromproduktion in G-D-Kraftwerken unterschiedlicher Leistung versus einer Stromeinfuhr. Um eine Bewertung von Kosten, Energieeinsatz, Emissionen, volkswirtschaftlichen Wirkungen von Investitionen und Betrieb vornehmen zu können, werden relevante G-D-Kraftwerke ausgewählt. Die Analysen werden mit einem quantitativen Modell durchgeführt.



Mit der Analyse **“Kennzeichnung von Elektrizität gemäss Art. 10bis EMG”** [29] (Bearbeitung: Econcept AG), werden die internationalen Erfahrungen mit der Kennzeichnung von Strom ausgewertet und es wird ein mögliches Vorgehen für die Einführung einer Kennzeichnungspflicht gemäss Art. 10bis des Elektrizitätsmarktgesetzes (EMG) vorgestellt. Es zeigt sich dabei, dass in Europa keine Kennzeichnungen bestehen, die sämtliche Produktionsarten umfassen. Umfangreiche Kennzeichnungsstandards wurden hingegen in einigen Bundesstaaten der USA eingeführt und sie werden als integraler Bestandteil eines liberalisierten Marktes betrachtet. Ein

möglicher Ablauf einer Kennzeichnung gemäss EMG ist in obiger Abbildung dargestellt.

Der ausgearbeitete Vorschlag wird als grundsätzlich realisierbar bezeichnet: Er beruht auf einer hohen Eigenverantwortung der Elektrizitätsbranche. Es werden minimale Standards vorgegeben, welche freiwillig mit normierten Angaben erweitert werden können. Bei importiertem Strom, der beispielsweise an einer Börse gehandelt wird, ist eine Herkunftsbezeichnung nicht möglich. Dieser Strom muss deshalb mit *“Art der Erzeugung: unbekannt; Herkunft: unbekannt”* gekennzeichnet werden.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des Forschungsprogramms *“Energiewirtschaftliche Grundlagen”* wird eine intensive nationale und internationale Zusammenarbeit gepflegt. Praktisch alle Projekte werden von kompetenten Begleit-

gruppen speziell betreut. Zudem bestehen vielfältige Kontakte zu internationalen Forschungsgruppen, Verwaltungsstellen, Verbänden, eidgenössischen und kantonalen Ämtern usw.

Transfer in die Praxis

Hauptabnehmer des Forschungsprogramms "Energie-wirtschaftliche Grundlagen" sind der Bundesrat und das Eidgenössische Parlament: Die Ergebnisse werden in vielfältiger Weise für die Beantwortung von politischen Vorstössen und die Abfassung von Bot-

schaften verwendet. Ebenfalls findet über diverse Fachzeitschriften und Medien ein Transfer zu interessierten Fachkreisen, aber auch einem breiten Publikum, statt [31].

Bewertung

Es darf festgestellt werden, dass im Bereich Energieperspektiven weitere Fortschritte erzielt worden sind: der Einfluss von einzelnen Faktoren kann recht gut erfasst werden und die effektive Entwicklung stimmt mit den erfassten Energiedaten weitgehend überein. Es liegen wichtige Grundlagen für eine Simulation von einzelnen Energiemassnahmen, aber auch die Analyse von Auswirkungen in energetischer

und wirtschaftspolitischer Hinsicht vor. Deutliche Fortschritte sind ebenfalls bei der Analyse von verschiedenen Energiemassnahmen erzielt worden. Damit werden gute Grundlagen für die eidgenössische und kantonale Energiepolitik, aber auch für einzelne Verbände und Organisationen geschaffen. Die Zusammenarbeit mit interessierten Kreisen konnte weiter verbessert werden.

Ausblick 2001

Die bestehende Projektliste [30] ist überarbeitet und deutlich ergänzt worden. Es finden weitere Ausschreibungen statt, wobei Fragen der Wirtschaftlichkeit und

weitere Energiemassnahmen im Vordergrund stehen werden.

Publikationen

(JB) Jahresbericht 1999 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

- [1] Brühlmann, K., (bruehlmann@wuestundpartner.com), WÜEST & PARTNER, Zürich: *Erhebung der durchschnittlichen Energiekennzahlen für Neubauten in 13 Kantonen* (SB)
- [2] Eckerle, K., (info@prognos.com), PROGNOSE AG, Basel: *Koordination der Modellierungs- und Perspektivarbeiten* (SB)
- [3] Hofer, P., (info@prognos.com), PROGNOSE AG, Basel: *Perspektiven des Energieverbrauchs in den Haushalten* (SB)
- [4] Aebischer, B., (bernard.aebischer@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, ETH-Zürich: *Perspektiven des Energieverbrauchs in Dienstleistungsbetrieben und Landwirtschaft* (SB)
- [5] Baumgartner, W., (basics@dial.eunet.ch), BASICS, Zürich: *Perspektiven des Energieverbrauchs in der Industrie* (JB)
- [6] Keller, M., (mario.keller@infras.ch), INFRAS, Bern: *Perspektiven des Energieverbrauchs des Verkehrs* (SB)
- [7] Eckerle, K., (info@prognos.ch), PROGNOSE AG, Basel: *Szenarien zu den Volksinitiativen "Strom ohne Atom" und "Moratorium Plus"* (SB)
- [8] Müller, A., (mueller@ecoplan.ch), ECOPLAN, Bern: *Ausstieg aus der Kernenergie – wirtschaftliche Auswirkungen. Analyse der Volksinitiativen "Strom ohne Atom und "Moratorium Plus" mit einem Gleichgewichtsmodell* (SB)
- [9] Zweifel, P. & Schneider, Y., (yschneider@soi.unizh.ch), SOZIOÖKONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT ZÜRICH: *Marginale Zahlungsbereitschaft für eine erhöhte Internalisierung des Risikos von Kernkraftwerken* (JB)
- [10] Jochem, E., Prof. & Jakob, M., (jochem@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, ETH-Zürich: *Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen* (JB)

- [11] Ott, W., (walter.ott@econcept.ch – a.binz@fhbb.ch), ECONCEPT AG, Zürich & FACHHOCHSCHULE BEIDER BASEL, INSTITUT FÜR ENERGIE, Basel: *Neu Bauen statt Sanieren* (JB)
- [12] Keller, L., (keller-burnier@span.ch), LAVIGNY & IPSO, Dübendorf: *Akzeptanz von Komfortlüftungen im Wohnungsbereich* (JB)
- [13] INFRAS AG, (mario.keller@infras.ch), Zürich & TNC CONSULTING, Männedorf: *Wirkungsanalysen kantonaler Förderprogramme nach Artikel 15 ENG* (JB)
- [14] Zaugg, Th., (zaugg@pom+.ch), POM+CONSULTING AG, GRUENBERG & PARTNER AG, & HERZOG, KULL GROUP, Zürich: *Facility Management (FM) und Energieeffizienz* (SB)
- [15] Brunner, C. U., (cub@cub.ch), SCHWEIZERISCHE AGENTUR FÜR ENERGIEEFFIZIENZ (S.A.F.E), Zürich: *“Effizienzmassnahmen im Strombereich”* (JB)
- [16] INFRAS AG, (markus.maibach@infras.ch), Zürich & METRON, Brugg: *Verminderung des Treibstoffverbrauchs: Instrumentenevaluation* (SB)
- [17] Kein JB bzw. SB vorhanden; vergleiche die zitierten NZZ-Artikel
- [18] Iten, R., (rolf.iten@infras.ch), INFRAS AG, Zürich & Jochem, E., (ejo@isi.fhg.de), FhG-ISI, Karlsruhe: *Förderung des Exports im Energiebereich* (JB)
- [19] Binder, H.-M. & Schaller, R., (hmbinder@interfache-politikstudien.ch; schaller@interface-politikstudien.ch), INTERFACE INSTITUT FÜR POLITIKSTUDIEN, Luzern: *Technologievermittlung im Energiebereich* (JB)
- [20] Grütter, (gruetter@bluemail.ch), GRÜTTER CONSULTING: *Warendeklaration für Personenwagen*
- [21] Brunner, C. U., (cub@cub.ch), CUB, Zürich: *Energieverbrauch im öffentlichen Verkehr*(JB)
- [22] Rohrbach, R., & Schmocker, F., (legair@gmx.ch; businessclass@datacomm.ch), Gymnasium Köniz, BUSINESS CLASS (LEGAIR): *Elektrofahrzeugplattform an einer Schule* (SB)
- [23] Frey, R. L. & Schaltegger, C., (christoph.schaltegger@unibas.ch), WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTLICHES ZENTRUM WWZ DER UNIVERSITÄT Basel: *Abgeltungen bei Infrastrukturanlagen? Grossprojekte zwischen Widerstand und Akzeptanz* (SB)
- [24] Walter, F., (walter@ecoplan.ch), ECOPLAN, Bern & FACTOR CONSULTING UND MANAGEMENT, Zürich: *Nachhaltigkeit: Kriterien und Indikatoren für den Energiebereich* (JB)
- [25] Carlevaro, F., (fabrizio.carlevaro@metri.unige.ch), UNIVERSITÉ DE GENÈVE, CENTRE UNIVERSITAIRE D'ÉTUDE DES PROBLÈMES DE L'ÉNERGIE, 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* (JB)
- [26] Banfi, S., (silvia.banfi@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, ETH-Zürich: *Verbesserung der Bedingungen der Wasserkraftwerke in der Schweiz* (JB)
- [27] Dettli, R., (econcept@econcept.ch), ECONCEPT AG, Zürich: *Marktöffnung im Gasbereich* (JB)
- [28] PROGNOSES, (info@prognos.ch), Basel: *Stromeinfuhr oder Gasverstromung im Inland*
- [29] Dettli, R., (econcept@econcept.ch), ECONCEPT AG, Zürich: *Kennzeichnung von Elektrizität gemäss Art. 10^{bis} EMG*
- [30] Meier, R., (ruedimeier@bluewin.ch), Programmleiter EWG: *Projektliste 2001/2002.*
- [31] Meier, R., (ruedimeier@bluewin.ch), Programmleiter EWG: *Publikationsliste EWG, Stand Januar 2001.*

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	Martin Stettler	Markus Zimmermann	
	Verkehr / Transports	Martin Pulfer	Martin Pulfer	
	Batterien und Supercaps / Bateries et supercaps			
	Elektrizitätsspeicherung & -transport / Stockage et transport de l'électricité	Erwin Gautschi	Roland Brüniger	
	Elektrizitätsnutzung (Geräte) / Utilisation de l'électricité (appareils)			
	Wärme-Kraft-Koppelung (ohne Brennstoffzellen) / Couplage chaleur-force (sans les piles à combustible)	Fabrice Rognon	Martin Zogg	Fabrice Rognon
	Verbrennung / Combustion	Alphons Hintermann	Alphons Hintermann	
	Brennstoffzellen (mit Wasserstoff) / Piles à combustible (à hydrogène)			
	Brennstoffzellen (Biobrennstoffe und Biogase) / Piles à combustible (aux biocarburants et au biogaz)	Martin Rüegegger	Martin Rüegegger	
	Prozesse (in Industrie, Gewerbe, Landwirtschaft,...) inkl. Abwärme / Procédés (dans l'industrie, les arts et métiers, l'agriculture) y compris les rejets de chaleur	Markus Geissmann	Martin Zogg	Markus Geissmann
II. Erneuerbare Energien / Sources d'énergie renouvelables	Solarwärmespeicherung / Stockage de la chaleur solaire	Urs Wolfer	Jean-Christophe Hadorn	
	Solarwärme / Énergie solaire thermique		Jean-Christophe Hadorn	Pierre Renaud
	Photovoltaik / Photovoltaïque		Stefan Nowak	
	Solararchitektur / Architecture solaire	Martin Stettler	Markus Zimmermann	
	Solarchemie inkl. Wasserstoff / Chimie solaire y compris l'hydrogène	Alphons Hintermann	Armin Reller	
	Umgebungswärme (Wärmepumpen) / Chaleur ambiante (pompes à chaleur)	Fabrice Rognon	Martin Zogg	Fabrice Rognon
	Biomasse (ohne Holz) / Biomasse (sans le bois)	Martin Rüegegger	Martin Rüegegger	Martin Rüegegger
	Kleinwasserkraftwerke / Force hydraulique			Hanspeter Leutwiler
	Holz / Bois	Daniel Binggeli	Daniel Binggeli	Christoph-W. Rutschmann
	Geothermie / Géothermie	Markus Geissmann	Harald L. Gorhan	
	Wind / Énergie éolienne		—	Robert Horbaty
III. Kernenergie / Energie nucléaire	Kerntechnik und nukleare Sicherheit / Technique et sécurité nucléaire	Christophe de Reyff	Wolfgang Kröger	—
	Regulatorische Sicherheitsforschung / Recherche réglementaire		Sabyasachi Chakraborty	—
	Kernfusion / Fusion nucléaire		Jean-François Conscience	—
IV. Energiewirtschaftliche Grundlagen / Fondements de l'économie énergétique	Energiepolitik / Politique énergétique	Martin Beck	Ruedi Meier	
	Ökonomie, Gesellschaft, Umwelt / Économie, société, environnement			
	Technologie-Transfer / Transferts technologiques	Andreas Gut, Christophe de Reyff, Gerhard 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
Erwin Gautschi, Tel. 031 / 323 50 04
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
Martin Rügsegger, Tel. 031 / 322 56 40
Gerhard Schriber, Tel. 031 / 322 56 58
Martin Stettler, Tel. 031 / 322 55 53
Urs Wolfer, Tel. 031 / 322 56 39

Die folgende Adresse ist für alle Obengenannten gültig : **BFE, 3003 Bern**

Adresses communes à tous les responsables : **OFEN, 3003 Berne**

Fax : 031 / 323 25 00

E-mail : **Vorname.Name@bfe.admin.ch / prénom.nom@bfe.admin.ch**

Adressen der Programmleiter ausserhalb des BFE /

Adresses des chefs de programmes à l'extérieur de l'OFEN :

Roland Brüniger
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 : jhadorn@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

Wolfgang Kröger
PSI, 5232 Villigen
Tel. 056 / 310 27 42 – Fax : 056 / 310 44 11
E-mail : kroeger@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
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
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

Allgemeine Auskünfte über die Energieforschung und P+D (Pilot- und Demonstrationsprojekte)
Renseignements généraux sur la recherche énergétique et P+D (Projets Pilotes et de Démonstration)

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

Christophe de Reyff, BFE, 3003 Bern
Tel: 031 / 322 56 66 Fax: 031 / 323 25 00

Bezugsort für Berichte aus Energieforschung und P+D
Centre de distribution pour les rapports de recherche énergétique et P+D

ENET, Egnacherstrasse 69, 9320 Arbon
www.energieforschung.ch
Tel: 071 / 440 02 55 Fax: 071 / 440 02 56

30.4.2001